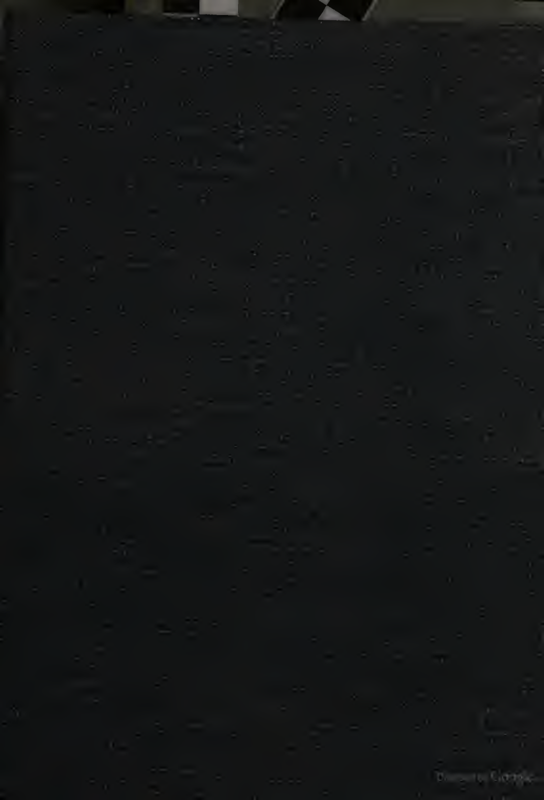


TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

Les numéros entre parenthèses qui se trouvent dans le texte renvoient aux articles à consulter. Quand l'article se trouve dans un autre volume que le numéro de renvoi, ce volume est indiqué en chiffres romains.

La fraction placée à côté du numéro d'ordre de certaines figures indique le rapport entre les dimensions linéaires du dessin et celles de l'appareil figuré.

Typogr. de Bonnal et Gibrac, rue St-Rome, 44, Toulouse.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

AVEC LES APPLICATIONS

A LA MÉTÉOROLOGIE ET AUX ARTS INDUSTRIELS

A L'USAGE

**DES FACULTÉS, DES ÉTABLISSEMENTS D'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE
ET DES ÉCOLES SPÉCIALES DU GOUVERNEMENT.**

PAR P. A. DAGUIN

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE,
PROFESSEUR DE PHYSIQUE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE TOULOUSE.

DEUXIÈME ÉDITION

Entièrement refondue, avec un grand nombre de figures intercalées dans le texte.



TOME QUATRIÈME.

TOULOUSE
ÉDOUARD PRIVAT
LIBRAIRE-ÉDITEUR,
Rue des Tourneurs, 45, hôtel Sipière.

PARIS
DEZOBRY, TANDOU & Cᵉ
LIBRAIRES-ÉDITEURS,
Rue des Écoles, 78.

1862

LIVRE VI.

OPTIQUE.

1865. De la lumière. — Si le *tact* nous fait connaître les corps qui sont près de nous, c'est par l'*organe de la vue* que nous est révélée l'existence de ceux auxquels nous ne pouvons atteindre, et cela au moyen d'une communication établie entre notre organe et ces corps. L'agent qui sert à cette communication est la *lumière ;* on peut donc la définir : l'agent qui nous fait connaître l'existence des corps par l'organe de la vue ; autrement dit la *cause de la vision.*

C'est à la lumière que nous devons le plus grand nombre de nos connaissances sur le monde extérieur ; sans elle, nous ne posséderions aucune notion sur les objets inaccessibles de notre globe, et sur les corps en nombre infini qui peuplent l'espace. Nous n'aurions qu'une idée très restreinte de l'univers ; c'est à peine si nous pourrions acquérir des notions incomplètes de l'étendue, par les enseignements bornés que nous fournissent le tact et la locomotion. Nos connaissances seraient réduites aux petites choses de notre globe, et l'intelligence, privée du stimulant du grand spectacle de la nature, ne recevrait qu'un faible développement. L'exemple des aveugles n'est pas une objection, car ils reçoivent communication des connaissances acquises par ceux qui voient.

Optique. — La partie de la physique qui a pour objet l'étude des propriétés de la lumière, se nomme l'*optique.* Cette science, très étendue, et une des plus intéressantes , tant par les merveilleux phénomènes qu'elle nous dévoile, que par les applications qu'on en fait chaque jour, n'a commencé à sortir de l'enfance que dans les temps modernes. Les anciens ne connaissaient de la lumière, que quelques lois relatives à sa propagation et à sa réflexion, mais ils avaient poussé assez loin l'étude des conséquences géométriques de ces lois. On doit à Ptolémée un ouvrage sur l'optique, aujourd'hui perdu. Albazen, savant arabe qui écrivait vers le X[e] siècle, cite souvent un traité d'optique d'un certain Euclide qui paraît être un autre que le fameux géomètre ; Théon parle de livres d'Archimède sur la réfraction, qui ne nous sont pas parvenus. Mais ce n'est qu'à partir de la fin du XVI[e] siècle que l'étude de la lumière s'est trouvée assez avancée pour qu'on ait pu l'appliquer à la cons-

truction des instruments d'optique, particulièrement de ceux qui viennent en aide à notre vue.

Nous diviserons l'optique en deux grandes sections. Dans la première, qui forme l'*optique géométrique*, nous considérerons les phénomènes relatifs à la marche des rayons, en partant de quelques lois expérimentales, et sans nous préoccuper de la nature de l'agent lumineux. Cette section comprend les connaissances des anciens; elle a été considérée longtemps comme une branche des mathématiques; et, en effet, une fois les premières lois établies, on peut en déduire une foule de conséquences, par les règles de la géométrie; ce qui explique comment Sanderson pouvait donner des leçons publiques d'optique, quoiqu'aveugle de naissance. Dans la seconde section, formant l'*optique physique*, nous étudierons une foule de phénomènes, dont la plupart n'ont été découverts que depuis le commencement du siècle actuel, et sont relatifs aux actions que les rayons exercent les uns sur les autres, ou dépendent de la constitution même de ces rayons, qui présentent des qualités différentes aux divers points de leur contour, et sont dits *polarisés*. Là, pour nous reconnaître au milieu d'un très grand nombre de faits, nous invoquerons le secours d'une théorie, celle *des ondulations*, au moyen de laquelle tous ces faits se lieront naturellement entre eux, et deviendront d'autant plus faciles à saisir, que la théorie aurait pu, le plus souvent, les prédire. En même temps, nous compléterons ce que nous avons dit (II, 745) des analogies de la lumière avec la *chaleur rayonnante*, en montrant que celle-ci produit les mêmes phénomènes que la lumière.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA NATURE DE LA LUMIÈRE. — PROPAGATION. PHOTOMÉTRIE.

§ 1. — DE LA NATURE DE LA LUMIÈRE, ET DE SON ORIGINE.

1866. De la nature de la lumière. — La lumière est un *agent impondérable*; mais, comme la chaleur, elle ne peut exister sans la matière pondérable, dans laquelle elle prend naissance et d'où elle s'élance dans le vide, qui la laisse passer, mais ne peut l'engendrer. Cet agent est d'une subtilité

extrême; car, si l'on regarde par une ouverture étroite, divers objets lumineux, chacun d'eux se voit nettement; les portions de lumière qu'ils lancent par l'ouverture s'y rencontrent donc sans se gêner mutuellement.

On a fait bien des hypothèses pour expliquer la lumière. Empédocle l'attribue à un écoulement continu de matière hors des corps lumineux. Démocrite, et, d'après lui, Epicure et Lucrèce, regardent la lumière comme formée de corpuscules d'espèce particulière lancés par ces corps. Aristote, qui nous a transmis le système d'Empédocle, semble admettre que l'impression de la lumière est due à la présence des corps transparents qui nous séparent des corps lumineux; ces corps transparents auraient la propriété de faire voir les objets placés derrière eux. Ainsi présenté, le système d'Aristote est bien peu intelligible; mais ce philosophe s'exprime plus clairement dans le 2e chapitre du livre II de son *Traité de l'âme*, quand il dit : « Que l'on suppose que ce soit la lumière ou l'air qui soit interposé entre l'œil et l'objet visible, en tout cas c'est par le *mouvement de ce milieu* que l'on voit. » Ne doit-on pas trouver dans ces mots, le germe du système des *ondulations?* — Les platoniciens considérent la lumière comme une émanation partant de l'œil et allant palper, pour ainsi dire, les objets; alors, pourquoi ne les voit-on pas dans l'obscurité? On a peine à comprendre comment on a pu s'arrêter à un pareil système, après les idées si simples d'Empédocle et de Démocrite.

Gassendi admet et développe le système de Démocrite : les corps lumineux nous envoient des particules capables d'agir sur notre œil, comme certains corps lancent des particules odoriférantes. Descartes suppose l'espace rempli de particules contiguës; le soleil, les corps lumineux, poussent celles qui les touchent, et l'impulsion se transmet aussitôt dans tous les sens. Il concluait de là que la lumière devait se transmettre instantanément, et cela lui semblait tellement évident, qu'il déclarait être prêt à convenir qu'il ne savait rien en philosophie, si l'on pouvait lui prouver que la lumière met un temps sensible à nous venir du soleil. Le système de Descartes a joui quelque temps d'une certaine faveur. Plusieurs physiciens, entre autres Nollet, l'adoptèrent en y apportant diverses modifications. Il est cependant en contradition avec les faits; car la réflexion ne peut exister sans l'élasticité des corpuscules, et il n'y aurait pas d'ombre derrière les corps éclairés. De plus, l'expérience prouve que la lumière ne se transmet pas instantanément.

Système des ondulations. — Mallebranche, en comparant les phénomènes lumineux à ceux du son, a posé les bases du *système des ondulations*, généralement admis de nos jours. Seulement, les tourbillons étant alors de mode, il suppose que les molécules des corps lumineux sont dans un mouvement rapide, qui se communique à de petits tourbillons de matière subtile remplissant tout l'espace; l'intensité de la lumière dépend de l'amplitude de ces mouvements, et les différences d'impression qui constituent les couleurs, de leur rapidité. Grimaldi a émis des idées semblables.

Cependant, Huyghens est considéré comme l'auteur du système des ondula-

tions. Avant lui, quelques physiciens en avaient bien adopté le principe, et s'en étaient servi pour expliquer quelques phénomènes, mais très vaguement. si bien qu'on n'y avait prêté que peu d'attention. Huyghens suppose que l'espace est occupé par l'*éther* (II,685), milieu très subtil et très élastique. qui remplit aussi les pores de la matière. Les molécules des corps lumineux sont animées de mouvements vibratoires très rapides, qui se communiquent à l'éther et s'y propagent (comme le son dans l'air), et viennent ébranler les fibres nerveuses du fond de l'œil. Ce systéme combattu par Newton, qui niait même la réalité de certains phénomènes qui le confirmaient, a d'abord été peu goûté. Mais, depuis les travaux de Hyoung, et surtout ceux de Fresnel, il a réuni tous les suffrages, à cause de la facilité avec laquelle il rend compte des faits les plus compliqués, dans leurs plus fins détails, sans qu'il soit nécessaire de faire d'hypothèse particulière pour chaque ordre de phénomène, et à cause de la bonne fortune qu'il a eue, plusieurs fois, de prédire des phénomènes inattendus, que l'expérience a ensuite complétement vérifiés.

Système de l'émission. — Newton a posé les principes et développé les conséquences du *système de l'émission*, dont il est regardé comme le créateur ; car les anciens n'avaient fait qu'indiquer le point de départ. Dans ce systéme, on admet que les corps lumineux lancent dans toutes les directions et avec une excessive rapidité, des particules de nature spéciale, d'une ténuité extrême, et très écartées les unes des autres ; ce qui fait qu'elles peuvent parcourir en tous sens un même espace, sans se rencontrer et sans se gêner mutuellement. Les différentes couleurs sont produites par des particules d'espèce différente. Ces particules devraient avoir une masse insensible ; car, malgré leur immense vitesse, elles sont incapables d'imprimer la plus faible impulsion aux corps les plus légers et les plus mobiles. Dufay et de Mairan suspendaient un moulinet à ailettes très léger, par l'extrémité de son axe à un aimant tout juste assez fort pour le soutenir. Bennet suspendait une fine aiguille d'acier, par un fil d'araignée, dont la force de torsion est tellement faible qu'on peut faire faire des milliers de tours à l'aiguille sans qu'elle cesse de rester en équilibre dans la position où on l'abandonne. Malgré cette excessive mobilité, la lumière solaire concentrée au foyer d'une forte lentille, et projetée sur le système mobile, ne pouvait le déplacer, quand on avait soin d'écarter tous les causes de perturbation.

Dans le système de l'émission, longtemps soutenu par l'autorité imposante de Newton, on est forcé de faire de nouvelles hypothèses pour chaque ordre de phénoménes, et il est des faits, en assez grand nombre, qu'on ne peut aucunement expliquer ; aussi, ce système est-il maintenant généralement abandonné. Euler, un des premiers, l'a attaqué avec une grande vivacité ; il s'oublie même jusqu'à l'appeler « l'égarement d'un grand homme. » Au reste, il n'y a plus en présence, que ce système et celui des ondulations, et nous citerons des expériences, relatives aux changements de vitesse de la lumière

quand elle passe d'un milieu dans un autre, qui tranchent complètement la question en faveur du système des ondulations.

Nous ajouterons enfin qu'Œrsted a voulu expliquer la lumière, en l'attribuant à des décharges électriques se faisant par des décompositions et des recompositions successives dans un milieu qui remplirait l'espace. La lumière est alors considérée comme un effet d'électricité en mouvement dans de certaines conditions. Mais il est bien difficile de concevoir, dans le vide, un milieu susceptible de se prêter à ce mode de décharge ; tandis que l'on comprend facilement comment l'électricité développée dans les corps pondérables, peut ébranler l'éther et produire des ondulations lumineuses.

1867. SOURCES DE LUMIÈRE. — Les corps lumineux par eux-mêmes ou qui produisent de la lumière, sont dits *sources de lumière*. Chacun des points de leur surface est un centre d'où la lumière s'élance dans toutes les directions en dehors du plan tangent à ce point. Cette lumière impressionne l'œil d'une manière qui dépend de sa *couleur*. Les corps non lumineux par eux-mêmes ne peuvent être *vus*, qu'à la condition d'être *éclairés*, c'est-à-dire de recevoir de la lumière venant d'une source lumineuse ; ils renvoient cette lumière suivant des conditions que nous expliquerons (1896) et se comportent alors comme des corps lumineux par eux-mêmes; mais ils ne peuvent, comme ces derniers, être vus dans l'obscurité. La lune, les planètes, ne sont pas des sources de lumière ; elles ne font que nous renvoyer les rayons qu'elles reçoivent du soleil, et nous n'en voyons que les parties éclairées. Si les rayons solaires qui tombent sur une partie de leur surface viennent à être interceptés, comme pendant les éclipses, ces parties cessent d'être visibles.

On distingue deux espèces de sources de lumière, les unes *permanentes*, comme le soleil, les étoiles, d'où la lumière nous arrive après avoir traversé des espaces immenses ; les autres *accidentelles*, que l'on peut diviser en *sources artificielles* et *sources naturelles*. Les premières sont produites par l'art, en mettant les corps dans des conditions convenables, ordinairement en les portant à une température suffisamment élevée. En effet, l'expérience prouve que tous les corps, vers 400 ou 500 degrés, deviennent lumineux, c'est-à-dire sont visibles dans l'obscurité ; tels sont les corps solides que l'on fait *rougir* au feu. Du reste, des surfaces différentes, également échauffées, rayonnent différemment. Ainsi MM. de la Provostay et P. Desains, ayant fait rougir au moyen d'un courant, une lame de platine dont une moitié était recouverte de noir de fumée, reconnurent que cette moitié avait beaucoup plus d'éclat que la partie nue. Avec l'or, la différence était encore plus marquée ; elle était à peu près insensible avec le borate de plomb. Le rayonnement de l'or nu n'est que de 0,01 de celui de l'oxyde de cuivre pris pour unité. Il y a donc à considérer un *pouvoir émissif* pour la lumière comme pour la chaleur. Nous avons donné, en parlant du pyromètre à air (II, 873), les températures approximatives qui répondent aux divers éclats lumineux désignés par les mots *rouge*

naissant, *rouge sombre*, *rouge blanc*, etc. Il résulte de là que les causes qui produisent une forte chaleur sont aussi des sources de lumière ; cependant il faut remarquer que, de même que la chaleur peut exister sans lumière sensible, de même la lumière peut se manifester sans chaleur appréciable, comme cela a lieu avec les corps *phosphorescents*, dont nous parlons plus bas (1868).

C'est le plus souvent au moyen de la combustion, et principalement de la combustion des gaz, que l'on produit artificiellement la lumière. Nous avons expliqué, en nous occupant de la flamme (II, 1056), comment son éclat dépend des particules solides qu'elle tient en suspension. La condition pour qu'une flamme rayonne beaucoup de lumière est donc la même que pour qu'elle rayonne beaucoup de chaleur. Mais il faut remarquer que, tandis que la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un poids donné de gaz est toujours la même, la quantité de lumière est variable et dépend de la manière dont se fait la combustion. La couleur des flammes dépend de la nature des substances pulvérulentes auxquelles elles doivent leur éclat ; c'est au moyen de sels ou d'oxydes mêlés à de la poudre, que les artificiers produisent ces vives couleurs avec lesquelles ils obtiennent leurs plus brillants effets.

Nous avons vu que l'électricité engendre la lumière toutes les fois que les deux fluides se combinent. Tantôt, cette lumière est d'un éclat éblouissant, quand il y a conflit entre de grandes quantités de fluide ; tantôt elle ne produit qu'une lueur faible, quand les électricités se recombinent à mesure qu'elles sont séparées, ou quand la recomposition se fait de molécule à molécule dans un corps pondérable, comme cela a lieu pour les aigrettes formées dans l'air, et lors de l'écoulement de grandes quantités de fluide le long d'un fil conducteur. C'est à l'électricité que la plupart des physiciens, et à leur tête M. Becquerel, attribuent, dans certains cas, la *phosphorescence*.

1868. Phosphorescence. — On désigne sous ce nom la propriété que possèdent certains corps de répandre une faible lumière sans dégagement sensible de chaleur. La phosphorescence peut être *spontanée*, ou être excitée par différents moyens.

Phosphorescence spontanée. — La lumière est due dans ce cas à des actions chimiques lentes que l'on suppose accompagnées de la production des deux électricités, se recombinant au fur et à mesure. C'est ce qui a lieu pour le phosphore proprement dit, qui absorbe de l'oxygène en formant des vapeurs acides ; et pour certains bois humides en décomposition, qui forment de l'acide carbonique aux dépens de l'oxygène de l'air. Les poissons de mer deviennent phosphorescents après la mort, quand ils sont dans un certain état de décomposition qui précède la putréfaction. Ici, la présence de l'oxygène ne paraît pas nécessaire, car M. Matteucci a reconnu que la lueur ne diminue pas sensiblement dans l'azote, l'hydrogène et l'acide carbonique [1]. Ayant agité les poissons dans de l'eau, il vit ce liquide prendre une apparence laiteuse et devenir lumineux.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 358.

L'eau ayant été laissée en repos dans l'obscurité, la lueur s'affaiblit peu à peu, et sembla se retirer vers la surface, où elle finit par disparaître. Agité de nouveau, le liquide redevient brillant, même dans le vide et dans les gaz privés d'oxygène. Quand on filtre cette eau, la matière lumineuse reste sur le filtre. Vers 38 à 40°, toute lumière disparaît pour toujours.

La mer, surtout dans la zone intertropicale, répand souvent une lueur assez vive partout où l'eau est irrégulièrement agitée, comme au sommet des vagues, sous le choc des rames ou de la proue des navires, dans le sillage qu'ils laissent aprés eux. Cette lumière est attribuée à une matière organique mêlée intimement à l'eau, et qui paraît être répandne par certains animaux. En effet, la phosphorescence de la mer peut être aussi produite par une multitude d'animalcules, méduses, béroés..., qui sont phosphorescents pendant la vie. Quelques espèces ont la faculté de répandre une matière organique qui rend l'eau lumineuse. MM. Qoy et Gaymard ayant pris, prés de l'île Rawack, deux de ces zoophytes, extrêmement petits, les mirent dans un vase rempli d'eau, et ce liquide devint bientôt lumineux dans toutes ses parties. C'est sans doute à ces petits animaux qu'est due la matière répandue dans la mer quand elle luit par l'agitation. On pourrait penser, d'aprés les expériences de M. Matteucci, que les poissons morts en décomposition contribuent à fournir cette matière. Mais ce physicien a constaté des différences importantes entre la substance lumineuse de ces poissons, et celle de la mer : tandis que la première cesse de luire quand on abaisse la température à + 3° ou + 4°, celle de la mer devient plus vive et plus persistante ; la premiére est détruite par l'alcool, l'éther, les acides, tandis que ces liquides augmentent beaucoup la phosphorescence de l'eau de mer.

Il y a aussi des animaux phosphorescents vivant dans l'air : des annélides, différents genres d'insectes, parmi lesquels des lampyres ou vers luisants, des fulgores, etc. Chez quelques-uns de ces animaux, la volonté paraît jouer un rôle dans le phénomène, et une chaleur modérée augmente le dégagement de lumière, qui peut persister pendant plusieurs jours aprés la mort, surtout s'il fait chaud. La présence de l'oxygène est nécessaire au dégagement de la lumière, qui est due à un fluide phosphorescent qui tantôt est renfermé dans certaines parties de l'animal, tantôt répandue dans toute sa substance. M. Matteucci a fait un grand nombre d'expériences sur le *Lampyris italica*[1]. Il a exprimé des derniers segments de l'abdomen, une matière jaune phosphorescente. Il a vu ces segments séparés, aussi bien que l'insecte vivant, cesser de briller à —8° ; et la lumière reparaître quand il élevait la température, pour disparaître à 50°. Cette lumière est continue vers 47° dans l'insecte vivant, chez lequel elle se produit ordinairement par intermittences. L'insecte vivant et les segments séparés cessent de luire dans l'acide carbonique et l'hydrogène. L'oxygène peut ramener la phosphorescence, et il l'augmente notablement, en formant de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XI, p. 71.

l'acide carbonique. Beccaria, Mayer... pensaient que l'insolation préalable était nécessaire pour que les vers luisants répandissent de la lumière. Mais M. Matteucci a pu conserver de ces animaux pendant 9 jours, dans des boîtes fermées renfermant de l'herbe, sans qu'ils aient cessé de luire, à quelque heure que ce fût.

Certains végétaux ont aussi la propriété de répandre une lueur assez vive pendant la nuit, après les journées chaudes : par exemple, les fleurs de couleur jaune, comme celles de la capucine, de l'œillet et de la rose d'Inde, du soleil et du souci des jardins. Il y a des champignons, entr'autres l'agaric de l'olivier, dont les feuillets qui garnissent le dessous du chapeau sont phosphorescents. La présence de l'oxygène est encore ici nécessaire. L'insolation préalable semble aussi devoir précéder le dégagement de la lumière ; car ces fleurs et ces champignons ne produisent pas ordinairement de lumière pendant le jour, quand on les porte dans l'obscurité.

Phosphorescence artificielle. — Les corps rendus phosphorescents par des moyens artificiels répandent des lueurs dont la couleur dépend de la nature de ces corps ; elles peuvent être blanches, jaunes, d'une teinte rouge, verte, bleue. M. Dessaigne et P. Heinrich, qui ont fait beaucoup d'expériences sur ce sujet, énumèrent quatre moyens pour exciter artificiellement la phosphorescence : 1° l'*élévation de la température* ; 2° les *décharges électriques* ; 3° les *actions mécaniques* ; 4° l'*insolation*.

1° une foule de corps solides deviennent phosphorescents quand on les projette sur une surface chaude. Par exemple, beaucoup de pierres précieuses, le diamant, la craie, les variétés colorées de chaux fluatée, les coquilles d'huître, les sulfates de potasse et de quinine..... Le papier, la farine, surtout celle de maïs, et en général les substances organiques bien desséchées, sont dans le même cas. La plupart de ces substances produisent des lueurs au-dessous de 100° ; les huiles volatiles en dégagent à 100°. Quand la chaleur change la structure des substances minérales pendant la phosphorescence, elle ne peut plus se reproduire. — M. Becquerel a d'abord attribué la phosphorescence à l'électricité ; et il expliquait pourquoi certains corps, comme les chlorures de sodium et de mercure, le sulfate de potasse, l'acide arsénieux vitreux, qui sont phosphorescents à 100°, cessent de l'être à la chaleur rouge, en remarquant qu'alors ils sont bons conducteurs, et que les électricités disparaissant trop promptement, elles ne peuvent acquérir la tension nécessaire pour que leur recomposition soit accompagnée de lumière. Aujourd'hui, on s'accorde généralement, en partant du système des ondulations, à admettre que la chaleur excite dans les molécules convenablement disposées de certaines substances, des mouvements vibratoires qui se propagent dans l'éther, à des températures bien au-dessous de celle du *rouge*, pour laquelle tous les corps deviennent ordinairement lumineux.

2° Pour manifester la phosphorescence par *décharge électrique*, on place le corps entre les branches de l'excitateur universel, et l'on fait passer la décharge.

Le corps répand alors une lueur assez vive, de couleur changeante, et qui persiste pendant quelques secondes. Les corps bons conducteurs ne deviennent pas phosphorescents par la décharge. Une foule de substances minérales non conductrices le deviennent, au contraire. MM. Dessaignes, Heinrich, et surtout M. Pearseal, ont fait beaucoup d'expériences sur ce sujet. On a reconnu que les substances qui ont perdu la faculté d'être phosphorescentes par insolation ou par la chaleur, peuvent la reprendre après avoir subi quelques décharges. Quand un corps répand à l'avance la lumière phosphorescente, la décharge augmente beaucoup l'intensité de cette lumière, laquelle est accompagnée souvent d'une série de magnifiques couleurs.

3° Les *actions mécaniques* ne produisent ordinairement la phosphorescence que pendant qu'elles ont lieu. La présence de l'électricité est ici le plus souvent évidente ; mais il est permis d'admettre cependant que l'ébranlement communiqué aux molécules concourt, dans la plupart des cas, au phénomène. Le frottement entre des substances non conductrices est souvent accompagné de lueurs assez vives, dont nous avons déjà parlé (III, 1423). Le choc fait jaillir la lumière de deux cailloux frappés l'un contre l'autre, et d'une foule de substances, la craie, l'oxyde de plomb... Le feldspath adulaire, frappé à coups de marteau de manière à se fendiller, présente dans chaque fissure une lueur qui peut persister pendant plusieurs minutes ; pilé dans un mortier, il paraît tout en feu. Le sucre écrasé entre les doigts est dans le même cas. Le clivage, la séparation des feuillets d'une carte, dégagent de la lumière. En général, les actions mécaniques rendent phosphorescentes les substances qui le sont par les autres moyens. Les corps très bons conducteurs, comme les métaux, ne sont donc pas dans ce cas. Pendant la cristallisation de certains corps, acide arsénieux, sulfates de potasse, de soude, il se produit de petits éclairs. M. Dumas a remarqué que l'acide borique fondu se fendille en se solidifiant, et que chaque fissure laisse dégager une assez vive lumière.

4° L'*insolation* ne paraît pas développer la phosphorescence aussi généralement que la chaleur. Elle ne peut l'exciter chez la plupart des bons conducteurs, ou elle ne la produit que pour un temps très court. Les mauvais conducteurs demandent souvent une longue exposition aux rayons solaires, mais alors ils luisent pendant longtemps. La plupart des substances à base calcaire deviennent phosphorescentes par insolation : le carbonate et le sulfate de chaux, la chaux fluatée, les pétrifications, les coquilles, les perles. Le diamant peut quelquefois rester phosphorescent pendant une heure, après avoir été exposé au soleil pendant quelques secondes seulement. Certaines substances organiques, la farine, le sucre, la gomme, la cire blanche, la résine, luisent après insolation. Le *phosphore de Canton* n'est autre chose que du sulfure de baryum que l'on obtient en chauffant avec du soufre, de la poudre de coquilles d'huître calcinées ; il répand, après insolation, une lumière jaune assez vive pour qu'on puisse lire l'heure sur une montre. La lumière d'une bougie suffit même pour y exciter la phosphorescence. Le *phosphore de Bologne*, ou sulfure de baryum obtenu en

calcinant un mélange de sulfate de baryte et de gomme, répand aussi une lumière vive, qui dure pendant plus d'une journée. Le *phosphore de Baudoin* (azotate de chaux fondu) répand une lumière blanche, etc. Nous reviendrons (chap. IV), quand nous parlerons des effets physiques que produisent les rayons lumineux, sur leur propriété d'exciter la *phosphorescence*, et nous verrons comment on a pu constater l'existence de ce phénomène, dans une foule de cas où il ne dure que très peu de temps.

§ 2. — De la propagation de la lumière.

I. — Propagation en ligne droite. — Ombres.

1869. La lumière se propage en ligne droite. — *Quand la lumière se transmet sans obstacle dans un milieu homogène, elle marche en ligne droite*, comme la chaleur rayonnante. Car, si l'on dispose entre l'œil et un point lumineux, plusieurs écrans percés d'un petit trou, on ne peut apercevoir le point lumineux qu'autant que tous les trous sont sur une même ligne droite passant par ce point.—On ne peut voir à travers un tube contourné, qu'autant qu'une ligne droite peut être menée entre ses extrémités, sans toucher les parois intérieures. — Enfin, si l'on fait entrer la lumière du soleil par une ouverture pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, on peut reconnaître la route qu'elle suit, au moyen des poussières en suspension dans l'air, qui sont visibles partout où elles sont éclairées, et l'on voit qu'elles forment un cylindre passant par l'ouverture.

On nomme *rayon de lumière*, toute direction partant d'un point d'un corps lumineux, et suivant laquelle la lumière se propage. Un *faisceau de lumière* est un cylindre dont chaque point est traversé par un rayon parallèle aux arêtes ; on le nomme *pinceau*, quand sa section est très petite. Chaque point d'un corps lumineux lance des rayons qui divergent dans toutes les directions prises en dehors du plan tangent en ce point ; on peut considérer une partie de ces rayons, et l'on a ainsi un *faisceau* ou un *pinceau divergent*. Nous ne pouvons isoler un simple rayon ; les plus fins pinceaux sont toujours composés d'un nombre infini de rayons.

1870. De la vision. — De tous les rayons divergents qui partent d'un point lumineux, une petite portion entre dans l'œil par l'ouverture de *la pupille*. Cette portion forme un cône, qui a pour base cette ouverture, et dont le sommet est au point lumineux. Ces rayons pénétrant dans l'œil, agissent sur les dernières ramifications d'un nerf spécial, le *nerf optique* ; d'où résulte l'impression de lumière et le phénomène de la *vision*. Nous étudierons plus tard le mécanisme de cette fonction ; pour le moment, nous remarquerons que l'impression est produite au fond de l'œil même, et que, cependant, nous avons la faculté de reconnaître la position et la distance du point lumineux. Mais

cela n'a lieu qu'à la suite de l'éducation de l'organe, qui a fini par s'habituer, en comparant certaines conditions de l'impression avec la distance, connue par le moyen du tact, à *voir* le point lumineux au sommet du cône de rayons divergents entrant par l'ouverture de la pupille.

Il résulte de ce principe, établi par Barlow à propos des images observées dans les miroirs courbes, que, si un pinceau de rayons partant d'un certain point *s* (*fig.* 1388) entre dans l'œil après avoir subi, par des causes quelconques, différentes déviations, le point *s* sera vu en *s'*, point de rencontre des prolongements des dernières directions que présentent les rayons avant d'entrer dans l'œil. Ainsi, ce que l'œil perçoit, c'est le degré de divergence des rayons, et c'est par un acte intellectuel subséquent qu'on a conscience de la position du sommet du cône, correspondante à ce degré de divergence, et qu'on y rapporte la position du point lumineux. C'est là l'origine d'une foule d'*illusions d'optique*, et d'une multitude d'effets curieux produits par divers instruments d'optique.



Fig. 1388.

Rayon visuel. Diamètre apparent. — On nomme *rayon visuel*, l'axe du pinceau conique qui entre dans l'œil, ou la ligne allant du sommet du cône au centre de la pupille. Si l'on mène des rayons visuels aux extrémités d'un diamètre transversal d'un corps, l'angle de ces rayons, qui a son sommet au centre de la pupille, se nomme le *diamètre apparent* ou *diamètre angulaire* de ce corps. Si, au lieu des extrémités d'un diamètre, on considère deux points isolés, on a leur *distance angulaire*. Il est facile de voir que la distance d'un corps à l'œil, est proportionnelle à la tangente du demi-diamètre apparent ; ou à ce diamètre même, s'il est assez petit pour qu'on puisse prendre l'angle pour la tangente.

1874. Corps transparents et corps opaques. — Il y a des corps à travers lesquels les rayons de lumière passent en conservant leur individualité et restant toujours distincts les uns des autres ; ils sont dits *diaphanes* ou *transparents* ; en regardant à travers ces corps, on peut distinguer nettement les objets. Tels sont le verre, l'eau, les gaz... D'autres laissent passer la lumière, mais en mêlant les rayons, qui, à leur sortie, n'ont plus de direction régulière; de manière qu'on ne peut distinguer nettement les objets qui sont du côté opposé ; on les nomme corps *translucides* ; tels sont le verre dépoli, le papier, l'albâtre, la corne, etc.

Il y a enfin des corps qui interceptent complétement les rayons lumineux ; ce sont les corps *opaques*, comme les métaux, le bois, les pierres... Ces corps laissent cependant passer la lumière, quand ils sont suffisamment minces. C'est ce qui a lieu, par exemple, suivant l'observation de Newton, pour l'or en feuille de 0^{mm},001 d'épaisseur. Ce résultat ne peut être attribué à l'exis-

tence de fissures dans la feuille d'or, car la lumière du jour ou celle d'une bougie, paraît verte vue à travers une feuille d'or ; ce qui n'aurait pas lieu si cette lumière passait par de petites ouvertures. C'est pour cela que les corps qui se présentent sous un très petit volume, comme les animaux infusoires, les fibres textiles, les poussières fines, les précipités chimiques, se montrent transparents, vus au microscope.

1872. OMBRE. — Quand un point lumineux isolé *s* (*fig.* 1389) envoie des rayons sur un corps opaque, ces rayons sont interceptés, et il y a du côté opposé du corps, un espace privé de lumière qu'on appelle l'*ombre*. Si l'on place un écran derrière le corps, une partie de cet écran n'est pas éclairée, et constitue l'*ombre portée*. Pour avoir la limite de l'ombre, on mène par le point *s* une tangente au corps, et on la fait tourner en l'appuyant constamment sur sa surface, de manière à engendrer un cône enveloppant. L'intersection de la surface de ce cône avec l'écran forme la limite géométrique de l'ombre portée, et la courbe de contact du corps avec la surface du cône est la ligne de séparation de l'ombre et de la lumière sur le corps.

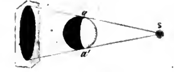


Fig. 1389.

Diffraction. — Nous verrons plus tard que les rayons de lumière qui rasent la surface du corps opaque, semblent s'infléchir suivant des lois particulières, de manière qu'il y a de la lumière dans l'ombre géométrique, et de l'obscurité, en certains points placés en dehors de cette ombre. Si ce phénomène, que nous étudierons plus tard sous le nom de *diffraction*, ne s'observe pas habituellement, c'est qu'on n'a pas habituellement affaire à un seul *point* lumineux, mais bien à un corps présentant une infinité de points rayonnants.

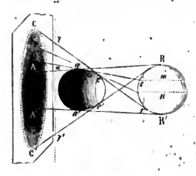


Fig. 1390.

1873. Pénombre. — Considérons maintenant un corps lumineux de dimensions finies RR' (*fig.* 1390), et soit *aa'* un corps opaque. Si nous construisons un cône enveloppant les deux corps, en faisant tourner la tangente commune *extérieure* AR, nous obtiendrons une courbe AA' sur l'écran, et une autre *aa'*, sur le corps, qui limiteront sur l'écran et sur le corps un espace dans lequel il ne parviendra pas de lumière. Si maintenant nous construisons un second cône en faisant tourner la tangente *intérieure* Ccr, ce cône donnera deux courbes CC', *cc'*, au-delà desquelles le corps et l'écran recevront des rayons lumineux, de tous les points du corps RR'. Entre les courbes AA', CC', et *aa' cc'*, il ne parviendra de rayons que d'une partie du corps RR', d'autant

plus petite que le point considéré sera plus rapproché de l'ombre absolue. Par exemple, s'il s'agit du point O, on voit, en menant de ce point une tangente O*oe* au corps opaque, qu'il ne parviendra en O que la lumière émanant de la partie R*m* du corps lumineux; et il en sera de même en *o* sur le corps opaque. Le point K ne recevra de même que la lumière émanant de la partie R*n*. L'espace compris entre les deux courbes, tant sur l'écran que sur le corps opaque, sera donc éclairé inégalement, et de plus en plus à partir de la limite de l'ombre absolue. Cet espace se nomme *pénombre*.

On voit que la pénombre est d'autant plus étendue que les deux corps sont plus rapprochés l'un de l'autre, et que l'écran est plus éloigné du corps opaque. Si, par exemple, l'écran était en $\gamma\gamma'$, la pénombre aurait pour largeur $\gamma\alpha$, moindre que AC. C'est pour cela que les ombres faites au soleil ou à la lumière d'une bougie, ont des contours nets quand le corps opaque est très rapproché de la surface qui reçoit l'ombre, et des contours diffus quand la distance est très grande. On voit que l'angle C*a*A = R*ar* n'est autre chose que le diamètre apparent du corps lumineux vu d'un point du corps opaque. Ainsi, pour le soleil, les rayons tangents aux corps opaques, et qui servent de limites à la pénombre, forment entre eux un angle de 30′, qui est le diamètre apparent moyen du soleil. C'est la pénombre qui existe derrière la terre éclairée par le soleil, qui fait que, dans les éclipses de lune, ce dernier astre perd peu à peu son éclat, au lieu de s'obscurcir tout d'un coup.



Fig. 1391.

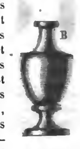


Fig. 1392.

Applications. — C'est en partie en imitant les teintes graduées que présente la pénombre sur les corps éclairés d'un seul côté, que les peintres produisent l'illusion en vertu de laquelle le dessin paraît en relief. On a fait une ingénieuse application de la pénombre pour produire certains effets de clair-obscur, au moyen des ombres portées : on découpe une carte de manière à représenter les contours d'un objet quelconque (*fig.* 1391), et l'on ouvre des jours correspondants aux parties qui doivent être représentées complètement éclairées. Si l'on place cette carte entre une bougie et un écran, et très près de l'écran, les ombres et les jours se présentent comme en A; mais si l'on éloigne la carte de l'écran, la pénombre devient sensible, et les teintes se fondent de manière à imiter un dessin à l'estompe, comme on le voit en B (*fig.* 1392).

On s'est servi des ombres formées au soleil, pour mesurer la hauteur d'édifices tels que AD (*fig.* 1393), quand on connaît le point D de la surface du sol, auquel aboutit la verticale qui passe par le point le plus élevé. Pour cela, on mesure la longueur DB de l'ombre portée, et on la compare à l'ombre *bd* d'une règle verticale *ad* de longueur connue. Comme les rayons solaires peuvent être regardés comme parallèles, les hauteurs AD et *ad* sont entre elles comme les

longueurs BD, *bd* des ombres. Cette méthode est attribuée à Thalès de Milet, qui mesura ainsi la hauteur des obélisques de l'Egypte, à la grande admiration du roi Amasis. La pénombre étant toujours très petite par rapport à la hauteur cherchée, le résultat est susceptible d'une assez grande précision. Cependant quand il s'agit d'obtenir exactement la position de l'extrémité de l'ombre, par exemple quand on veut tracer une méridienne au moyen des ombres du style d'un gnomon, la plus petite incertitude est à considérer. On termine alors le style par une plaque percée d'un petit trou, à travers lequel passent les rayons solaires, qui viennent peindre au milieu de l'ombre de la plaque, une image nette du trou, comme nous allons le voir.

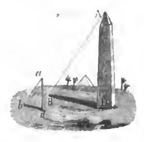


Fig. 1393.

1874. Images produites par les très petites ouvertures. — Quand la lumière partant d'un corps, entre dans une chambre noire par une très petite ouverture, elle vient peindre sur un écran opposé, une image de ce corps, quelle que soit la forme de l'ouverture. Aristote avait observé ce phénomène sur le soleil et la lune, et il cherchait à en rendre compte en disant que la lumière conservait une *ressemblance* avec le corps lumineux, qu'elle reprenait dès qu'elle avait franchi l'obstacle qui la gênait. On se contenta de cette prétendue explication, ou plutôt on regarda le fait comme inexplicable, jusqu'à Maurolicus et Kepler. Voici comment raisonne le premier :

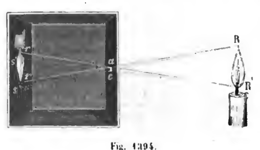


Fig. 1394.

Supposons que l'on mène par un point *a* du contour du petit trou (*fig.* 1394) des lignes droites aboutissant à chacun des points du corps lumineux RR', chacune de ces droites rencontrera l'écran et pourra être prise pour un rayon lumineux venant apporter sur cet écran la lumière partant du point correspondant, avec son éclat particulier et sa couleur. Chaque point éclairé de l'écran renvoie dans tous les sens la lumière qu'il reçoit (1870) et il est vu comme s'il était lumineux par lui-même. Chaque point de l'écran ne reçoit ainsi qu'un seul rayon, et donne une image, évidemment renversée, du corps lumineux. Si l'on fait les mêmes constructions pour tous les points de l'ouverture, on obtiendra une infinité d'images presque entièrement superposées, et d'autant mieux, que l'ouverture sera plus petite par rapport à la

distance de l'écran ; ainsi, les points *a* et *c* de l'ouverture donneront les images *rr'*, *ss'*, qui se dépasseront mutuellement de quantités insensibles si la distance *ac* est extrêmement petite.

Kepler présente la même explication d'une manière différente : imaginons que chaque point du corps lumineux soit le sommet d'un pinceau pyramidal de lumière allant former sur l'écran une image de l'ouverture, comme cela a lieu, en effet, avec un simple point lumineux, par exemple, une étoile. Si les images n'avaient pas de dimensions appréciables, on conçoit que chaque pinceau pourrait être considéré comme un simple rayon, et que l'écran recevrait une image renversée de l'objet. Les petites images empiétant les unes sur les autres, formeront de même une image de l'objet, mais un peu confuse, et d'autant plus que l'ouverture sera plus grande. Remarquons aussi que le contour de l'image sera d'autant plus net que l'ouverture sera plus petite ; c'est ce qui fait l'exactitude du gnomon dont le style est muni d'une plaque percée d'un très petit trou (1873).

Chambre noire simple. — Cet appareil, imaginé en 1560 par Jean-Baptiste Porta, consiste simplement en une boîte (*fig.* 1394), dans laquelle la lumière ne peut pénétrer que par une très petite ouverture *ac* pratiquée dans une plaque mince. La lumière lancée par les objets extérieurs vient peindre leur image renversée sur un écran opposé au trou. Cette image est évidemment d'autant plus grande, que l'écran est plus éloigné ; mais en même temps elle est moins brillante, la même quantité de lumière se trouvant répartie sur une plus grande surface. Pour que l'image soit nette, il faut que l'ouverture soit très petite ; mais alors le nombre des rayons qui tombent au même point de l'écran étant moindre, l'image présente peu d'éclat. Si l'on agrandit l'ouverture, l'image est plus brillante, mais moins nette. Nous verrons plus tard comment Porta a évité ce double écueil, par l'emploi d'une lentille.

Chaque jour, nous sommes témoins d'effets produits par les petites ouvertures : dans les chambres fermées, souvent la lumière pénétrant par des fentes, de petites ouvertures des volets, vient peindre sur les murs, sur le plafond, les images plus ou moins confuses des objets extérieurs. Les rayons solaires, en passant par les interstices des feuilles des arbres, forment sur le sol des images arrondies, ordinairement elliptiques, les rayons venant frapper obliquement le sol. La lune donne ainsi des images représentant ses différentes phases. Dans les éclipses de soleil, l'image de cet astre est un croissant ; quand l'éclipse est annulaire, l'image présente elle-même la forme d'un anneau.

II. Mesure de la vitesse de la lumière.

1875. Les anciens croyaient généralement que la lumière se transmettait instantanément. Cependant plusieurs philosophes ont admis sa propagation progressive. Tel était Empédocle, qui répondait même à ceux qui lui objectaient

que les astres seraient alors vus hors de leur véritable position, parce que la lumiére nous en arriverait d'une direction qu'ils auraient déjà quittée, que le mouvement du ciel n'est qu'une apparence provenant de ce que la terre tourne autour de son axe, et qu'alors l'observateur allant trouver le rayon qu'il reçoit, voyait l'astre sur son prolongement, où il se trouve réellement. Parmi les modernes, F. Bacon est un des premiers qui ait admis la propagation successive de la lumiére. Galilée, qui partageait cette opinion, essaya de lever toute incertitude par l'expérience; il se plaça sur une montagne, à une distance de 1800 métres d'un observateur muni, comme lui, d'une lanterne allumée, qu'il devait découvrir au moment où il verrait disparaître celle de Galilée. Cet illustre physicien pensait que, si la lumière mettait un temps appréciable à aller d'une station à l'autre, il verrait disparaître la lumiére de l'observateur opposé, quelques instants aprés avoir caché la sienne. Mais les lumiéres parurent disparaître exactement au même instant. Les académiciens de Florence firent des expériences semblables avec des distances trois fois plus grandes, sans obtenir de meilleur résultat.

C'est à l'astronome danois Rœmer qu'est due la premiére évaluation de la vitesse de la lumiére. Il prit ses distances dans les espaces planétaires, et se servit des éclipses du premier des quatre satellites de Jupiter qui sont visibles avec une lunette. Peu s'en fallut que D. Cassini ne le précédât dans cette belle expérience ; ayant aperçu quelques retards dans les éclipses du premier satellite, il les attribua à ce que la lumiére ne se transmettait pas instantanément, et trouva qu'elle devait employer 14 minutes à traverser l'orbite terrestre. Malheureusement il renonça à cette idée, les autres satellites ne lui ayant pas donné les mêmes résultats ; ce qui tenait à l'incertitude de l'instant précis de leurs éclipses, due à la lenteur de leurs mouvements, et à la pénombre qu'ils traversent avant de disparaître, pénombre insensible pour le premier satellite, qui est le plus rapproché de la planéte.

1876. Méthode de Rœmer. — En 1755, Rœmer, en examinant les tables des éclipses des satellites de Jupiter, calculées par D. Cassini, remarqua que, dans les oppositions, c'est-à-dire quand Jupiter était en ligne droite avec le soleil et la terre et à la plus petite distance de cette planéte, les éclipses avaient lieu u[illegible]lus tôt qu'elles n'étaient annoncées ; et qu'elles avaient lieu plus tard[illegible]s conjonctions, où Jupiter est à la plus grande distance possible de la terre. Il remarqua en outre que, dans les positions intermédiaires, l'avance ou le retard étaient proportionnels aux changements de distance de la terre à Jupiter. Il conclut de là, comme l'avait d'abord fait D. Cassini, que la lumiére se propage avec une vitesse susceptible d'être évaluée, et il procéda à sa mesure.

Jupiter J (*fig.* 1395) accomplit sa révolution autour du soleil, S, en 11 ans et 10 mois environ, et le premier satellite accomplit en 42 heures et 30 minutes sa révolution *synodique* autour de la planéte, c'est-à-dire qu'il met ce temps à revenir à une même position par rapport à une ligne JS qui joindrait le

centre de Jupiter à celui du soleil, ligne qui se déplace avec la planète. Pour obtenir le nombre de 42ʰ 30ᵐ, on cherche le temps qui s'écoule, entre deux *immersions* consécutives du satellite dans le cône d'ombre projeté derrière la planète. Pour cela, on observe un assez grand nombre d'immersions consécutives, et l'on divise le temps total par le nombre des éclipses. Cela doit se faire dans le voisinage des conjonctions ou des oppositions ; parce que les distances iT, JT, i'T de Jupiter à la terre T, ne changeant pas alors sensiblement d'un jour à l'autre, la vitesse de la lumière n'a pas d'influence sur le résultat. On ne peut, du reste, observer aux conjonctions et oppositions même, l'ombre de Jupiter étant conique, et le contour de cette ombre se trouvant alors caché par le corps de la planète, comme on le reconnaît en menant la ligne Ta tangente à Jupiter. En i', au contraire, le moment de l'immersion pourra s'observer, et en i celui de l'émersion.

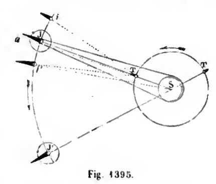


Fig. 1395.

Cela posé, on observe l'heure exacte d'une immersion du satellite, en J dans le voisinage de l'opposition ; puis, quelques mois plus tard, l'heure exacte d'une autre immersion, en J', dans le voisinage de la conjonction. La terre étant venue en T' lors de cette seconde observation, la distance T'J' de la terre à Jupiter est plus grande que lors de la première, de tout le diamètre de l'orbite terrestre ; le moment de l'immersion paraîtra donc retardé, par rapport à ce qu'il eût été si la distance n'avait pas varié, de tout le temps nécessaire à la lumière pour traverser le diamètre de cette orbite. Si ce temps était insensible, en divisant l'intervalle écoulé entre les deux observations, par 42ʰ et 30ᵐ, on devrait trouver un *nombre entier* représentant le nombre d'éclipses accomplies. Or, on trouve un reste, qui est, d'aprés les expériences trés précises de Delambre, de 16 minutes 26 secondes, et qui provient du retard apporté au temps de la seconde observation. La lumière emploie donc 16ᵐ 26ˢ à franchir le diamétre de l'orbite terrestre. Divisant ce diamétre, qui est d'environ 76 461 000 lieues de 4000 métres, par 16ᵐ 26ˢ, on trouve 77 000 lieues, ou 8 fois environ le tour de la terre, pour l'espace parcouru en 1ˢ, c'est-à-dire pour la vitesse de la lumière. On ne peut répondre de l'exactitude du second chiffre, à cause des incertitudes des observations.

La lumière du soleil met 8ᵐ 13ˢ à nous venir du soleil ; un boulet de canon, qui conserverait toujours sa vitesse initiale, emploierait 17 ans à franchir le même espace. La lumière met environ 1 heure 18 minutes à aller du soleil à Saturne, et 4 heures à aller jusqu'à Uranus. Les étoiles sont tellement éloignées, que la lumière qui jaillit des plus rapprochées met au moins 5 ans

à nous parvenir. Or, si l'on considére cette multitude de petites étoiles qu'on n'aperçoit qu'au moyen d'instruments grossissants, ou mieux encore ces nébuleuses dans lesquelles on ne peut distinguer avec les plus puissants télescopes aucuns points lumineux distincts, tandis que d'autres peuvent se résoudre en un amas de très petites étoiles ; il sera permis d'admettre que ces corps lumineux sont à des distances de nous égales à des milliers et même des millions de fois la distance de l'étoile la plus rapprochée. La lumière doit donc mettre des siécles et des milliers d'années à nous venir de ces astres, et si l'un d'eux venait à être anéanti par une cause inconnue, nous continuerions à le voir briller paisiblement, au moyen de la lumière qui serait en route au moment de la catastrophe, de même que nous continuons à percevoir un son, quand la cause qui l'a produit n'existe plus.

1877. Vitesse de la lumière déduite de l'aberration. — L'aberration des étoiles, qui résulte de la combinaison du mouvement de la terre autour du soleil avec la transmission progressive de la lumière, dont elle peut servir à calculer la vitesse, consiste en une déviation apparente des étoiles, du côté vers lequel marche la terre [1]. Comme cette déviation n'a pas lieu, au même moment, dans le même sens pour toutes les étoiles, leurs distances angulaires sont différentes aux diverses époques de l'année, et c'est par là que Bradley a découvert l'aberration, qu'il a ensuite expliquée de la manière suivante :

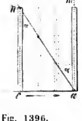


Fig. 1396.

Considérons une étoile envoyant de la lumière au point *a* de la surface de la terre dans la direction *sa* (*fig.* 1396). Si la terre était en repos, c'est suivant *as* qu'il faudrait diriger le tuyau d'une lunette pour voir l'étoile. Mais si la terre se déplace dans le sens de la flèche *ca*, il est évident que, pour qu'une molécule ou une ondulation lumineuse suive l'axe du tube, celui-ci devra être tourné dans une direction *cn*, telle que le point *c* se déplace de la quantité *ca* pendant que la lumière parcourt l'espace *na*. L'étoile apparaîtra alors dans la direction *as'*, tandis qu'elle est réellement dans la direction *as*. L'angle *nam* se nomme l'*angle d'aberration*. On voit que la lumière parcourant l'espace *na* pendant qu'un point de la surface de la terre se transporte de *c* en *a*, on aura, en appelant V la vitesse de la lumière, *v* celle de la terre, et α l'angle d'aberration.

[1] $V : v = \overline{na} : \overline{ca} = \sin \overline{acn} : \sin \alpha;$ d'où $\sin \alpha = \frac{v}{V} \sin \overline{acn}.$

On voit que l'aberration est maximum quand l'angle *acn* est droit, c'est-

[1] Le mouvement de la terre autour de son axe n'étant que de $\frac{1}{10}$ de lieue par seconde à l'équateur, n'intervient pas sensiblement dans le phénomène.

à-dire quand la lunette est perpendiculaire à la tangente *ca* à l'écliptique au point qu'occupe la terre ; elle est donc maximum au même instant pour toutes les étoiles qui sont comprises dans le plan normal à cette tangente. Elle est nulle, au contraire, quand on a $acn = 0$, c'est-à-dire pour les étoiles qui sont sur le prolongement de l'élément de l'écliptique parcouru par la terre au moment de l'observation ; ce qui pouvait se prévoir facilement. L'aberration passe donc chaque année par deux maximum de sens inverse, séparés par un intervalle de 6 mois. Les étoiles placées dans le plan de l'écliptique semblent décrire une petite ligne droite ; celles qui sont au pôle de l'écliptique décrivent une circonférence ; et celles qui occupent des positions intermédiaires, des ellipses d'autant plus allongées que ces étoiles sont plus éloignées du pôle de l'écliptique. Le grand axe de chaque ellipse est perpendiculaire à un plan passant par l'étoile, et normal à la courbe que parcourt la terre.

L'équation [1] donnerait la valeur de V, si *v* et l'angle d'aberration étaient connus. Or, la position réelle de l'étoile est au centre de l'ellipse qu'elle semble décrire, puisque l'aberration change de sens tous les 6 mois. Le maximum d'aberration a donc pu être mesuré ; il est égal à 20″,44, c'est-à-dire que le grand axe apparent de l'ellipse que semble décrire annuellement l'étoile, est de 40″,88. L'angle *acn* étant égal à 90° dans le cas du maximum, la formule donne $V = \frac{v}{\sin 20'',44}$; *v* étant la vitesse moyenne de la terre dans son orbite, vitesse égale à 76 lieues par seconde.

Si nous supposons V connu, on pourra tirer de l'équation précédente la valeur de *v*. Or on a, en regardant l'orbite terrestre comme une circonférence de rayon *r*, $2\pi r = vt$, *t* étant le temps de la révolution de la terre autour du soleil, exprimé en secondes. On pourra tirer de là la valeur de *r* ou la distance moyenne du soleil à la terre, qui sera ainsi déterminée d'après des observations d'étoiles, ou d'astres pris en dehors de notre système planétaire.

La vitesse de la lumière déduite de l'aberration diffère de moins de 0,01, du nombre trouvé par la méthode de Rœmer. Remarquons, du reste, que celle-ci donne la vitesse dans le vide des espaces célestes, tandis que l'autre fait connaître la vitesse dans l'air.

La méthode de l'aberration semble pouvoir se prêter à la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans les liquides : Boscovich écrivait en 1766, à Lalande, qu'il y aurait moyen de mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau par la méthode de l'aberration, en remplissant d'eau le tube de la lunette, dont les verres seraient appropriés au nouveau milieu qu'elle contiendrait. Mais Fresnel a prouvé que la direction de l'instrument est indépendante du fluide qu'il contient à cause de la *réfraction* des rayons à leur entrée dans ce fluide.

1878. Mesure de la vitesse de la lumière sur de faibles distances. — M. Fizeau est parvenu à mesurer la vitesse de la lumière sur une distance de quelques kilomètres, et sans prendre de point de comparaison dans les

espaces célestes. Ces belles expériences qui, datent de 1849, ont été faites par une méthode analogue à celle qu'a employée le même observateur, conjointement avec M. Gounelle, pour mesurer la vitesse de l'électricité (III, 1602). Voici le principe de cette méthode. On fait passer en travers d'un faisceau de rayons lumineux, les dents d'une roue tournant rapidement, dents qui sont séparées par des intervalles égaux à leur épaisseur. La lumière est interceptée par les dents, et ne passe en chaque point du faisceau, que par intermittences. Cette lumière va se réfléchir perpendiculairement sur un miroir plan placé à une grande distance; revient sur elle-même, et passe de nouveau par les dents de la roue. Or, celle-ci s'est déplacée, pendant que les molécules ou l'ébranlement lumineux a parcouru deux fois la distance qui sépare le miroir, de la roue; si donc celle-ci tourne avec une vitesse convenable, la lumière qui aura passé entre deux dents, trouvera à son retour une dent à la place d'un intervalle, et sera interceptée; de sorte qu'en regardant à travers la roue dans la direction du miroir, on ne verra aucune lumière. Le temps employé par

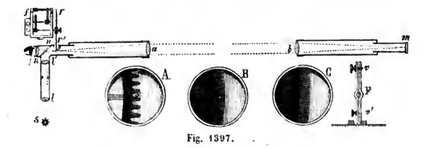


Fig. 1397.

la lumière pour aller de la roue au miroir, et à revenir, sera égal au temps qu'il faut aux dents pour venir occuper la place des vides qui les séparent; temps que l'on peut déduire de la vitesse de la roue, et du nombre de ses dents. Si, par exemple, la roue fait t tours par seconde et si elle a n dents, il faudra $1 : nt$ secondes pour qu'une dent vienne prendre la place de la précédente, et $1 : 2nt$ pour qu'elle prenne la place du vide précédent.

La figure 1397 représente la disposition de l'appareil, construit par M. Froment. La roue dentée se voit de profil en rr'; elle est mise en mouvement par un poids, par l'intermédiaire de rouages à dents héliçoïdales; un compteur fait connaître sa vitesse. Cette vitesse peut être modifiée au moyen d'un frein agissant sur l'arbre f de la troisième roue, et dont on voit la disposition, à part, en F; les vis v, v' servent à serrer plus ou moins l'arbre, jusqu'à ce qu'on ait obtenu la vitesse désirée. Les rayons lumineux émanant d'une source s, traversent deux lentilles l, l', sont réfléchis par une glace transparente nn inclinée à 45°, et se concentrent en un foyer o, placé précisément au point où passent les dents de la roue rr'. Puis, ces rayons traversent une lentille a, qui les rassemble en un faisceau cylindrique. Ce faisceau

franchit, sans perdre de son intensité autrement que par l'absorption de l'air, l'espace qui sépare l'appareil, d'un miroir plan éloigné, *m* ; il traverse d'abord une lentille *b*, qui rapproche les rayons et les concentre en un foyer, à la surface même du miroir *m*. Ce dernier les renvoie, de manière à former un faisceau réfléchi qui suit en sens inverse la route du faisceau incident, traverse la lentille *a*, forme aussi un foyer au point *o*, et après avoir traversé la glace *nn*, vient tomber dans l'œil de l'observateur armé d'une loupe. Quand la roue ne tourne pas, la lumière réfléchie en *m* apparaît sous la forme d'un point lumineux entre deux dents de la roue, comme on le voit en A. Quand la roue tourne avec une vitesse croissante, on distingue le point lumineux de plus en plus faiblement, à travers l'espace que parcourent les dents, comme en B. Enfin, si la vitesse est convenable, le point lumineux disparaît, comme en C. Avec les dimensions de la roue employée par M. Fizeau, il suffisait de 12,6 tours par seconde pour obtenir ce résultat. Si l'on accélère alors le mouvement de la roue, le point lumineux reparaît, comme on pouvait le prévoir ; et il disparaît de nouveau quand la vitesse devient double, triple... de celle qui correspondait à la première éclipse. Les essais de M. Fizeau ont été faits entre Suresnes et la butte Montmartre, dont la distance est de 8633 mètres ; ils lui ont donné une vitesse de 78,841 lieues de 4 kilomètres par seconde. L'Académie des sciences de Paris a fait construire un grand appareil destiné à répéter ces remarquables expériences, dans des conditions aussi favorables que possible.

Nous verrons en parlant de la comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau (ch. VI) une méthode par laquelle on mesure ces vitesses dans un espace de quelques mètres seulement.

1879. Vitesse des rayons de différentes couleurs. — La méthode de M. Fizeau permettra de résoudre directement la question de savoir si les rayons de différentes couleurs se propagent avec la même vitesse dans l'air ; il suffira d'expérimenter avec des flammes colorées. La méthode de l'aberration conduit à admettre l'égalité de vitesse dans le vide, car l'aberration est la même pour toutes les étoiles, quelles que soient leurs dimensions et leur couleur. Mais cette méthode n'est pas assez précise pour ne pas laisser de doutes à ce sujet. Arago a proposé trois manières de résoudre la question. Nous verrons plus tard que la lumière blanche est formée par un mélange de rayons de différentes couleurs. Or, si ces rayons ne se propagent pas avec la même vitesse, un satellite de Jupiter, quand il s'éclipsera, devra changer de couleur avant de disparaître ; car, des derniers rayons lancés au moment de l'immersion, les plus lents devront nous arriver après les plus rapides, et ne leur seront plus mélangés. Aux émersions, au contraire, les rayons colorés les plus rapides nous arrivant les premiers, le satellite paraîtra d'abord coloré, et d'une manière différente. Or, on ne voit rien de semblable. Ce moyen, qui paraît avoir été indiqué par Newton, dans une lettre à Flamsteed, n'est pas très précis à cause de la pénombre, et de l'atmosphère de Jupiter. Arago a proposé encore d'observer l'ombre des satellites sur la planète, et de voir si

elle est bordée de bandes colorées à ses bords antérieur et postérieur. Enfin, il a signalé les étoiles changeantes comme pouvant fournir des indications sur le même sujet. La diminution d'intensité équivalant à une suppression de lumière, ces étoiles devraient changer de couleur en changeant d'éclat. Malheureusement les variations d'éclat se font très lentement, puisque la période la plus courte est de 2 jours et 21 heures, pour *Algol* de Persée. Néanmoins, des observations suivies instituées par Arago sur cette étoile, n'ayant permis de distinguer aucun changement de couleur, il est permis d'admettre que tous les rayons colorés marchent avec la même vitesse ***dans le vide***, d'autant mieux que cette égalité est une conséquence du système des ondulations, le seul qui rende compte de tous les phénomènes lumineux.

§ 3. — PHOTOMÉTRIE.

1880. La *photométrie* est la partie de l'optique qui s'occupe des lois de l'intensité de la lumière, et de la comparaison des intensités des diverses sources lumineuses. Nous allons d'abord établir trois principes, que nous avons déjà trouvés dans l'étude de la chaleur rayonnante.

I. Variation de l'intensité avec la distance. — *L'intensité de la lumière émanant d'un point, varie en raison inverse du carré de la distance.* Nous entendons par intensité, la quantité de lumière reçue par l'unité de surface. Ce principe, énoncé pour la première fois par Kepler, se démontre de la même manière que pour la chaleur rayonnante (II,774); il constitue une des lois générales de la nature, puisque nous l'avons vu présider aussi à la gravitation, à l'intensité du son, aux forces magnétiques, électriques, et électro-magnétiques. Il suppose, pour la lumière comme pour la chaleur, que chaque rayon conserve individuellement son intensité, c'est-à-dire qu'aucune partie n'est absorbée par le milieu ambiant.

Quand, au lieu d'un simple point lumineux, on considère un corps lumineux de dimensions finies, la même loi s'appliquant à chaque point, s'appliquera aussi à l'ensemble, si le corps est assez éloigné pour que tous ses points puissent être considérés comme également distants de la surface éclairée. Dans ce cas, le diamètre apparent variant en raison inverse de la distance (1870), on peut dire que l'*intensité de la lumière varie en raison directe du carré du diamètre apparent*, ou de la *surface apparente* du corps lumineux, en appelant ainsi l'angle conique d'un cône enveloppant ce corps, et ayant son sommet au point éclairé.

On peut vérifier par expérience la loi qui nous occupe, en réunissant plusieurs bougies égales, pour former des sources d'intensité 4, 9, 16... fois plus intenses; et l'on reconnaît au moyen des photomètres que nous décrirons plus loin (1885), que ces systèmes doivent être placés à une distance double, triple, quadruple.... pour éclairer une surface donnée, de la même manière

qu'une simple bougie. Cela suppose, ce que l'on peut considérer comme évident, que 4, 9.... bougies égales lancent 4, 9.... fois autant de lumière qu'une seule.

Conséquences. — Cette première loi nous explique pourquoi, dans l'expérience de la chambre noire de Porta (1874), l'éclat en chaque point de l'image est indépendant de la distance de l'objet lumineux ou éclairé qui la produit, quand cette distance est assez grande pour qu'on puisse négliger celle de la petite ouverture, à l'image formée. En effet, l'intensité de l'illumination produite par le pinceau de rayons émanant d'un point de l'objet et passant par l'ouverture, varie en raison inverse du carré de la distance à cette ouverture. D'un autre côté, le diamètre de l'image est en raison inverse de la distance de l'objet à l'ouverture; car, en appelant D et d les distances de l'objet et de l'image à cette ouverture, on a (*fig.* 1394) : $\tang \frac{1}{2}\,\overline{rar'} = \tang \frac{1}{2}\,\overline{RaR'} = \frac{\overline{rr'}}{2d} = \frac{\overline{RR'}}{2D}$, d'où $rr' = \frac{\overline{RR'}.d}{D}$. Le diamètre de l'image étant en raison inverse de la distance D, sa surface est en raison inverse du carré de cette distance. La quantité de lumière qui part de l'objet est donc concentrée dans un espace 4, 9.... fois moindre, quand l'intensité de chaque pinceau est rendue 4, 9.... fois plus petite à cause d'une distance 2, 3.... fois plus grande; il y a donc compensation. Cela nous explique pourquoi les corps *lumineux* présentent *sensiblement* le même éclat quand on les voit à des distances différentes; c'est que notre œil, comme nous le verrons, est une véritable chambre noire. C'est ainsi que les planètes, en particulier *Vénus*, paraissent toujours aussi brillantes quand elles sont à une même hauteur au-dessus de l'horizon et que l'atmosphère est également pure, quoique leur distance à la terre, et par conséquent leur diamètre apparent, varie beaucoup dans le cours d'une année. Il en est de même des flammes des becs de gaz, quand la quantité de lumière absorbée par l'atmophère est négligeable; ce qui suppose l'air bien pur, et les différences des distances pas trop considérables. Il faut supposer aussi que l'ouverture de la pupille, par laquelle la lumière pénètre dans l'œil, reste constante; ce qui n'a pas toujours lieu, comme nous le verrons.

Arago a soumis récemment ces conséquences à une nouvelle épreuve, dans des conditions un peu différentes, et en employant la lumière renvoyée par un corps *éclairé*. Deux feuilles d'un même papier, éclairées par le soleil, sont disposées parallélement, à des distances différentes, derrière un écran. Cet écran est percé d'une large fente, qui se projette en partie sur chacune des feuilles. On les regarde à travers la fente, et l'on trouve qu'elles présentent exactement le même éclat. C'est que, si l'intensité de la lumière émanant de chaque point est en raison inverse du carré de la distance, le nombre des points qui peuvent envoyer de la lumière à l'œil par la fente, est en raison directe du carré de cette distance, ce qui compense exactement.

1881. II. Intensité de la lumière reçue obliquement. — *L'intensité de la lumière reçue sur une même surface, est proportionnelle au cosinus*

de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à cette surface. Cette loi se démontre comme pour la chaleur rayonnante (II,775). Nous remarquerons qu'elle est relative à la quantité de lumière *reçue* par la surface, et non à la quantité que celle-ci peut réfléchir, laquelle peut dépendre, comme nous le verrons, de l'inclinaison des rayons incidents.

1882. Intensité de la lumière émise obliquement. — *L'intensité de la lumière émanant d'une surface lumineuse par elle-même, est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons avec la normale à la surface.* Pour constater ce résultat, on n'a qu'à regarder à travers une petite ouverture, une surface incandescente, que l'on incline plus ou moins par rapport à la direction des rayons qui vont à l'œil ; on ne remarque pas de changements dans l'éclat de la lumière reçue ; d'où l'on conclut la loi, au moyen du raisonnement que l'on fait dans le cas de la chaleur rayonnante (II,776). La pupille pouvant remplacer la petite ouverture, on voit que l'éclat d'une surface lumineuse ne dépend ni de sa forme ni de son inclinaison par rapport aux rayons qui vont à l'œil ; l'impression reste la même que celle que produirait une surface plane de même éclat, qui serait la projection de la surface lumineuse sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons qui entrent dans l'œil. C'est pourquoi un boulet rouge, vu de loin, ressemble à un disque. Il en est de même du soleil, quoique ses bords soient un peu moins brillants que les parties centrales (II,1097) ; mais cela provient de la nature gazeuse de la *photosphère* qui forme la partie lumineuse de l'astre (II,1092).

1883. Formule d'illumination. — On peut résumer en une seule formule, établie par Lambert, les trois lois précédentes. Soit S la projection d'une surface courbe lumineuse, sur un plan quelconque, et I l'intensité des rayons émis normalement à cette projection, intensité mesurée par l'illumination que produit l'unité de surface, à l'unité de distance. Considérons les rayons émis dans une direction formant un angle e avec la normale à la projection, et tombant sur un plan situé à une distance d, en faisant avec la normale à ce plan, un angle égal à r. On aura, pour l'*illumination* E du plan, c'est-à-dire pour la quantité de lumière reçue sur l'unité de surface.

$$E = \frac{I \cdot S \cdot \cos e \cdot \cos r}{d^2}.$$

Cette formule suppose que le milieu que traversent les rayons incidents n'exerce aucune absorption sur ces rayons.

1884. COMPARAISON DES INTENSITÉS DE DEUX SOURCES LUMINEUSES. — Huyghens paraît être le premier qui se soit occupé de comparer les intensités de deux lumières ; il chercha le rapport entre l'éclat du soleil et celui de l'étoile Sirius, en regardant les deux astres à travers un petit trou pratiqué dans un écran, et comparant les distances auxquelles il devait se placer pour leur trouver le même éclat. Maurolicus, en 1525, s'est aussi occupé de semblables comparaisons. Le capucin François-Marie, en 1700, cherchait le nombre de lames de

verre qu'il fallait placer devant chacune des deux lumières pour qu'elles parussent de même éclat, et il supposait la perte d'intensité proportionnelle au nombre des lames, ce qui est inexact. Auzout avait cherché à comparer la lumière des planètes à celle du soleil. Celsius cherchait à quelle distance il fallait se placer des deux lumières à comparer, pour cesser de distinguer des cercles ou autres signes tracés sur une feuille de papier ; il formait ainsi ce qu'il nommait un *lucimètre*. Ce moyen a été longtemps le seul que l'on connût pour comparer deux lumières de couleur différente. Euler a fait des comparaisons nombreuses entre les « degrés de lumière » du soleil et des autres corps célestes, mais en partant seulement de principes mathématiques, et s'appuyant sur quelques suppositions vraisemblables, mais non démontrées. C'est à Bouguer et à Lambert que sont dues les recherches les plus étendues sur la photométrie, surtout au premier. Arago a laissé un grand et remarquable travail sur la photométrie, mais nous ne pourrons en parler qu'après avoir traité des principes élevés d'après lesquels est construit l'appareil dont il a fait usage.

1885. Photomètres. — On nomme *photomètres* les appareils destinés à comparer les intensités des sources lumineuses. Bouguer en a imaginé plusieurs ; dans tous, il part de ce fait que, si l'œil est incapable d'apprécier la différence entre les intensités de deux lumières, il constate facilement l'existence de la moindre différence dans le degré d'illumination de deux surfaces identiques. Un de ces photomètres (*fig.* 1398) consiste en une feuille translucide; de papier, ou de verre dépoli, disposée verticalement et séparée en deux parties *a*, *a'* par un écran opaque *e* perpendiculaire au plan *aa'*. Les deux lumières *l*, *l'* à comparer, sont placées de manière que chacune d'elles n'éclaire que la partie de la feuille qui se trouve de son côté, et que ses rayons tombent suivant la même obliquité que ceux de l'autre. L'œil étant placé en *o* sur le prolongement de l'écran *e*, l'on éloigne la lumière la plus intense, jusqu'à ce que les deux parties *a*, *a'* paraissent également éclairées. Les intensités des deux lumières sont alors en raison *directe* des carrés des distances à la surface *aa'*. En effet, *i* et *i'* représentant les intensités des sources *l*, *l'*, c'est-à-dire les quantités de lumière envoyées sur l'unité de surface à l'unité de distance, et *d*, *d'* étant les distances au plan *aa'*, les quantités de lumière envoyées sur l'unité de surface de *a* et de *a'*, seront $i : d^2$ et $i' : d'^2$; et comme les deux surfaces sont également éclairées, on aura $i : d^2 = i' : d'^2$. Il faut que les lumières soient assez éloignées pour que les rayons soient tous sensiblement parallèles, et que les diamètres apparents des corps lumineux vus de la surface éclairée, soient négligeables.

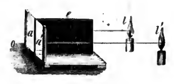


Fig. 1398.

Bouguer a aussi fait arriver les rayons des deux lumières sur la feuille de papier, à travers deux tuyaux en forme de tronc de cône, placés l'un contre

l'autre ; mais il est moins facile de juger de l'égalité d'éclat de deux surfaces éclairées circulaires, que de celui de deux surfaces rectangulaires très rapprochées par tout un côté.

Photomètre de Ritchie. — Dans un tuyau en carton noirci (*fig.* 1399) sont disposés deux miroirs identiques *ac*, *ac'*, inclinés à 45°. Les deux lumières à comparer *l*, *l'* envoient leurs rayons sur ces miroirs ; ces rayons sont réfléchis, et tombent sur une feuille de papier huilé tendue sur une ouverture latérale *nn'*. On éloigne la lumière la plus intense, jusqu'à ce que les deux parties *an*, *an'* soient également éclairées, pour l'œil placé dans la direction *ao*. On peut remplacer les miroirs par des feuilles de papier, et alors on supprime la feuille tendue en *nn'*.

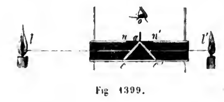


Fig 1399.

Photomètre de Rumfort. — Cet appareil, que l'on peut construire en quelques minutes, est le plus simple et un des plus exacts que l'on connaisse. Il consiste en une feuille de papier verticale *mn*, et M N (*fig.* 1400) derrière laquelle est fixé verticalement un petit cylindre *a*, A. Les deux lumières *l*, *l'* ; L, L', étant placées à peu près sur la perpendiculaire à *mn* passant par l'axe du cylindre *a*, ce cylindre projette deux ombres *o*, *o'* sur l'écran. Chacune

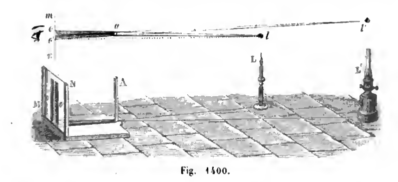


Fig. 1400.

de ces ombres est éclairée par l'une des lumières seulement. Ainsi, l'ombre *o'*, formée par la lumière *l'*, est éclairée par des rayons tels que *lo'* émanant de *l*. Le reste de l'écran est illuminé par les deux lumières à la fois. On éloigne la plus intense jusqu'à ce que les deux ombres paraissent de même teinte, pour l'œil placé du côté opposé, sur la perpendiculaire au milieu du plan *mn*. Pour rendre la comparaison plus facile, on déplace latéralement l'une des lumières, de manière que les deux ombres se touchent sans empiéter l'une sur l'autre. Alors, la plus petite différence de teinte devient sensible. Quand on est arrivé à

l'égalité, les intensités des lumières sont en raison *directe* des carrés de leurs distances à l'écran MN. Il est essentiel que les lumières soient assez éloignées pour qu'on puisse les considérer comme des points ; il faut aussi qu'elles aient sensiblement la même couleur. Pour plus d'exactitude, il faut faire plusieurs expériences avec des distances différentes, et prendre la moyenne ; cette remarque s'applique à tous les photomètres.

Photomètre de Bunsen. — Cet instrument est tout aussi facile à construire que le précédent, mais il ne paraît pas donner des résultats aussi précis. Il consiste en une feuille de papier tendue sur un cadre, au milieu de laquelle est appliqué un petit disque de papier mince, et qu'on éclaire par derrière avec une lampe d'intensité constante. Le disque forme tache au milieu de la feuille éclairée. On place en avant, une des sources à comparer, la lumière réfléchie sur la feuille s'ajoute à la lumière transmise, et en avançant plus ou moins la source, on finit par voir disparaître la tache que forme le disque, ce qui a lieu quand on a $T+r=t+R$, en désignant par T et t les quantités de lumière transmises en chaque point de la feuille nue et garnie du disque, et par R et r les quantités réfléchies. On répète l'expérience avec l'autre source, qui éclaire la feuille exactement comme la première, au moment où le disque disparaît. Les deux sources sont alors entre elles comme les carrés de leurs distances à la feuille. — Au lieu de coller un disque de papier sur la feuille, on peut y laisser tomber une goutte de stéarine, qui en augmente la translucidité.

1886. Photomètre de Leslie. — Cet instrument n'est autre chose qu'un thermomètre différentiel (II, 708), dont l'une des boules est dorée, et dont on place les deux boules à la même distance de la source de lumière. Leslie suppose que l'intensité lumineuse est proportionnelle à l'effet calorifique, mesuré par le déplacement de l'index vers la boule nue. Or, cette proportionnalité ne peut être admise, car le pouvoir diathermane du verre dépend, comme nous l'avons vu, de la nature des rayons calorifiques. Au reste, voici à cet égard une expérience décisive : Arago ayant exposé le photomètre de Leslie aux rayons solaires, vit l'index marcher vers la boule nue ; aux rayons d'une lampe d'Argant, l'index marcha en sens inverse; et à ceux qui émanaient du feu d'une cheminée, il resta à peu près stationnaire. Il n'est donc pas permis de comparer les intensités lumineuses, par les déplacements de l'index. Aussi, les résultats obtenus par Leslie en comparant la lumière du soleil à celle de la lune et d'une bougie, diffèrent-ils beaucoup de ceux qui ont été trouvés par des méthodes plus exactes. Cependant, l'instrument de Leslie peut donner d'assez bons résultats dans certains cas particuliers; par exemple, quand on veut comparer les intensités successives d'une même source.

1887. Photomètre de M. Wheatstone. — Ce petit instrument, destiné à comparer les lumières artificielles, est plus précis qu'on ne pourrait le croire au premier abord ; il est surtout employé pour comparer les becs de gaz. Il consiste en une boîte cylindrique C de 5^{cm} de diamètre (*fig.* 1401), traversée suivant son axe, par un arbre auquel on imprime un mouvement de rotation, au

moyen d'une manivelle n, et de deux roues dentées intérieures. Cet arbre entraîne un bras a, à l'extrémité duquel tourne un pignon attaqué par des dents taillées dans le pourtour du cylindre. Ces dents étant en nombre quadruple de celles du pignon, ce dernier fait quatre tours pendant que le bras a en fait un. On enfonce, dans des aiguilles que porte le pignon, un disque en liége d sur lequel est collée une petite ampoule sphérique en verre m étamée en dedans, représentée en M avec sa grandeur réelle. La lumière produit, par réflexion sur l'ampoule, un point brillant qui décrit un cercle pendant la rotation du levier a, si ce point se trouve exactement sur l'axe du pignon. Ce cercle paraît sous la forme d'un trait brillant et continu quand la vitesse de rotation est suffisante. Quand le point brillant n'est pas sur l'axe du pignon, il décrit une courbe à quatre parties égales, dont la forme dépend de la distance du point brillant à l'axe du pignon. Si cette distance est assez grande, la courbe affecte la forme qui se voit en A.

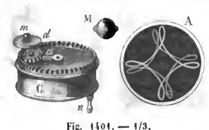


Fig. 1401. — 1/3.

Cela posé, si l'on fait tomber sur l'appareil, les rayons des deux lumières que l'on veut comparer, chacune d'elles produit sur l'ampoule un point brillant particulier, et l'on voit deux courbes, comme en A. On éloigne l'une des sources, jusqu'à ce que les deux courbes présentent le même éclat ; ce qui se reconnaît facilement, parce qu'elles sont entrelacées l'une dans l'autre, et l'on prend le rapport des carrés des distances. La différence d'épaisseur des deux courbes lumineuses pourrait induire en erreur, mais le rayon de la sphère réfléchissante est tellement petit, que cette différence est insensible.

1888. Photomètre électrique de M. Masson. — Cet appareil présente l'avantage de permettre de comparer des lumières de couleur différente. Il se compose d'un disque sur lequel sont tracés des secteurs noirs et blancs de mêmes dimensions, et qu'un mouvement d'horlogerie fait tourner avec une vitesse constante de 200 à 250 tours par seconde. Alors, le disque, éclairé par une lumière permanente, paraît d'une teinte grise uniforme, à cause de la persistance de l'impression dans l'œil. Si ensuite on l'illumine avec une lumière instantanée, par exemple avec une étincelle électrique, on distingue tous les secteurs comme s'ils étaient fixes, parce qu'ils n'ont pas le temps de se déplacer pendant la durée de cette lumière instantanée. Si l'on affaiblit graduellement l'intensité de cette dernière, par exemple en l'éloignant, il arrive un moment où le surcroît d'illumination qu'elle produit sur les secteurs est trop faible pour être sensible à l'œil, et le disque continue à paraître d'un gris uniforme. La limite d'intensité de la lumière instantanée, pour laquelle elle cesse de rendre les secteurs visibles, varie avec la sensibilité de l'œil; mais elle est constante pour un même œil dans le même état. Quant au rapport des intensités des deux

lumières continue et instantanée, quand on arrive à cette limite, il dépend évidemment du nombre des secteurs et de la vitesse de rotation.

On conçoit comment on pourra comparer l'éclat de différentes étincelles, quand la lumière continue sera d'intensité constante ; il suffira de prendre le rapport des carrés des distances des étincelles au disque tournant, au moment où l'on cesse de distinguer les secteurs. L'expérience montre que la distance limite se détermine très nettement ; car les secteurs disparaissent presque subitement, quand on éloigne peu à peu du disque, les boules entre lesquelles partent des étincelles de même intensité. — Si, au contraire, on veut comparer les intensités de deux lumières continues, on fera jaillir des étincelles identiques, et l'on rapprochera peu à peu l'une des lumières constantes, jusqu'à ce que les secteurs cessent d'être distingués pendant l'étincelle. On fera de même pour l'autre lumière, et l'on prendra pour leur rapport, le rapport des carrés de leurs distances au disque. On voit que la couleur des lumières comparées ne gênera en rien l'opération.

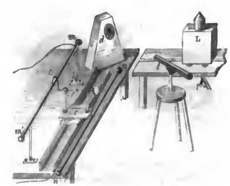


Fig. 1402.

Expériences de photométrie électrique. — M. Masson a appliqué cette méthode photométrique à l'étude de la lumière électrique[1]. La *fig.* 1402 représente l'ensemble de l'appareil employé. *d* est le disque tournant ; il fait un angle de 45° avec les directions des rayons des deux lumières ; on le regarde à travers un tube *t* noirci en dedans. La lumière constante est renfermée dans une boîte L présentant une ouverture du côté du disque, et pouvant se placer à différentes distances, mesurées sur une règle divisée. L'étincelle est produite en *e*, entre deux boules isolées que l'on peut rapprocher plus ou moins l'une de l'autre, au moyen d'une vis micrométrique adaptée à la tige de l'une d'elles. Ces boules sont portées par une table *c*, qui glisse sur deux règles horizontales, dont une porte une division servant à mesurer la distance au disque *d*. L'étincelle est fournie par un condensateur, qui se décharge de lui-même dès que la charge peut vaincre les résistances du circuit. Ce condensateur est placé dans une chambre voisine, ainsi que la machine électrique. L'électricité positive arrive par une rigole isolée pleine de mercure, *mm'*, qui reçoit un crochet métallique *o* fixé à l'une des boules. L'électricité négative arrive dans une autre rigole *nn'*, dans laquelle plonge une languette en relation avec l'autre boule. Les

[1] *Ann. de ch. et de phys.*, 3e série, t. XIV, p. 129 ; t. XXX, p. 5 ; t. XXXI, p. 295.

fils réophores aboutissant l'un en m, l'autre en n', on voit que le circuit conserve toujours la même longueur, quelle que soit la position de la table c.

Après avoir vérifié que l'intensité de la lumière de l'étincelle varie en raison inverse du carré des distances aux surfaces éclairées, M. Masson a constaté que cette intensité est : 1° *proportionnelle aux surfaces des condensateurs* ; 2° *en raison inverse de leur épaisseur* ; 3° *proportionnelle aux carrés des distances d'explosion* ; 4° *les quantités de lumière sont proportionnelles aux quantités de chaleur développées dans un fil fin faisant partie du circuit.* Les quantités de chaleur se mesuraient au moyen du thermomètre électrique de M. Riess (III, 1333). Les trois premières lois sont représentées par la formule $i = K \frac{sd^2}{aD^2}$; dans laquelle i est l'intensité de la lumière de l'étincelle, s et a la surface armée et l'épaisseur du condensateur, d la distance d'explosion, et D la distance du disque tournant. En vertu de la quatrième loi, la formule $t = n \frac{e^2}{s}$, qui représente l'échauffement t d'un fil traversé par la décharge, en fonction de la quantité e d'électricité accumulée dans un condensateur de surface s (III, 1333), peut aussi servir à représenter l'intensité de la lumière, quand la distance reste constante.

1889. Résultats d'observations photométriques. — Un premier résultat à signaler, c'est que la flamme est parfaitement transparente ; en effet, l'effet produit par une série de bougies juxta-posées, reste le même quand cette série est perpendiculaire et quand elle est parallèle à la direction des rayons reçus. Un bec de gaz à flamme très aplatie, dit *papillon* ou *chauve-souris*, éclaire de la même manière dans toutes les directions.

Bouguer a reconnu que, dans la méthode de Rumfort, l'une des ombres formées par des lumières *égales*, disparaît quand l'une de ces lumières est 8 fois plus éloignée de l'écran que l'autre, c'est-à-dire quand la plus rapprochée éclaire l'écran 64 fois plus que celle qui produit l'ombre qui disparaît. Le résultat reste le même, quelles que soient les intensités absolues des deux sources. Arago a reconnu que l'ombre alors insensible, devient distincte quand on la fait mouvoir en déplaçant latéralement la lumière qui la produit. Il résulte de l'expérience de Bouguer, qu'une lumière en fait disparaître une autre 64 fois plus faible ; d'où il résulte que, si les étoiles et les planètes ne sont pas visibles pendant le jour, c'est que l'atmosphère nous envoie de la lumière au moins 64 fois plus forte que celle qui nous parvient de ces astres. C'est par une raison semblable que, le soir, on ne distingue pas les objets extérieurs, d'une chambre très éclairée, et que le jour on ne distingue rien, du dehors, dans une chambre sombre.

On a reconnu que deux becs de gaz ordinaires équivalent à trois lampes d'Argant dépensant 42 grammes d'huile par heure. D'après Brande, un bec de gaz remplace dix bougies de 5^{gr}, ou 12 chandelles de 82^{gr}, quand ce bec dépense 42^{litres},6 de gaz oléfiant pur, ou 79^{l},87 de gaz extrait de l'huile, ou

enfin $214^{l},98$ de gaz de houille. On a pu aussi comparer les qualités éclairantes des gaz provenant des différentes variétés de houille, étudier les formes les plus favorables des becs et des cheminées de verre. On a reconnu, par exemple, que les cheminées dont la grosseur diminue par une courbure graduée au-dessus de la flamme, donnent plus de lumière, pour le même prix, que celles dont le diamètre change brusquement; qu'un bec de gaz donne le plus de lumière, à dépense égale, quand, le gaz sortant par une couronne de trous au milieu de laquelle passe l'air, le canal intérieur de l'air et la cheminée sont plus étroits, et les trous plus nombreux.

Quand les flammes de deux bougies se touchent, l'intensité est plus grande que la somme de leurs intensités observées séparément. Franklin, auquel est due cette observation, attribue le résultat à l'élévation plus grande de la température. Rumfort, partant de ce fait, a expérimenté sur des mèches plates imbibées d'huile, et a reconnu que ces mèches, réunies presque au contact, donnent beaucoup plus de lumière, pour une même dépense d'huile, que lorsqu'elles sont séparées. Arago et Fresnel ont imaginé, pour les phares, des lampes à plusieurs mèches concentriques séparées par des intervalles parcourus par de l'air appelé au moyen d'une cheminée commune. La flamme étant transparente, on obtient ainsi beaucoup de lumière dans un petit espace. Ils ont trouvé, en comparant cette flamme à celle d'une lampe Carcel, que la lumière produite est proportionnelle au poids d'huile dépensé.

Une même bougie peut donner une lumière variant de 100 à 60, suivant l'état de la mèche. Mais c'est surtout avec les chandelles que les variations sont sensibles : suivant Rumfort, si l'on représente par 100 l'intensité d'une chandelle fraîchement mouchée, cette intensité n'est plus que 39, après 11 minutes; 23, après 19^{m}; et 16, après 29^{m}. Ces différences énormes tiennent à ce que la colonne opaque formée par la mèche, intercepte une partie des rayons, et, que, cette colonne empêchant l'air de se mêler au gaz, une partie du charbon précipité n'est pas brûlée et forme de la fumée, et une portion du suif se perd en vapeur non décomposée.

Equivalents d'éclairage. — On nomme ainsi les poids des substances diverses qu'il faut brûler pendant le même temps pour obtenir la même intensité de lumière, ou les volumes de ces substances quand il s'agit de gaz. Ces quantités dépendent, pour une même substance, de la manière dont la combustion se fait et de diverses autres circonstances.

D'après Rumfort, 100 représentant le poids de cire qu'il faut brûler sous forme de bougie, pour obtenir une certaine quantité de lumière, il faut, pendant le même temps, brûler 101 *de suif*, la chandelle étant toujours bien mouchée, et 229, quand la mèche est longue; 110 d'huile d'olive, dans une lampe d'Argant, et 129 dans une lampe ordinaire brûlant sans fumée; 125 d'huile de navette, et 120 d'huile de lin dans une lampe ordinaire. On voit combien on dépense de suif en pure perte, avec une chandelle non mouchée.

110 litres de gaz extrait de la houille équivalent à 30 litres de celui qu'on

extrait de l'huile, et donnent la même quantité de lumière que 42^{gr} d'huile brûlée dans une lampe Carcel dont la mèche est constamment traversée par un excès d'huile. La lampe d'Argant, où l'huile n'arrive pas en excès dans la mèche, donne une lumière moins vive.

Peclet ayant calculé la dépense par heure, pour une même quantité de lumière, correspondante à différents systèmes d'éclairage, a formé le tableau suivant, en supposant le prix du bec de gaz de 5 centimes par heure :

Lampe Carcel.	*chandelle de 82^{gr},*	*chandelle de 16^{gr},*	*bougie de cire de 100^{gr},*	*bougie de stéarine.*
5,8	9,8	12,0	18,6	18

On voit que l'éclairage par le gaz est le plus économique. Les résultats dépendent, du reste, de la manière dont se fait la combustion, de la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'air pénètre dans la flamme, de la forme des mèches et des becs, de la longueur de la flamme. Par exemple, un simple jet de gaz dont la flamme a deux pouces de longueur, et qui donne une quantité de lumière représentée par 100, donne 150 quand la flamme a 4 à 5 pouces de long; l'orifice étant plus étroit, de manière que la dépense de gaz reste la même. Avec un bec formé de trous rangés circulairement, l'intensité lumineuse est représentée par 1, quand la flamme n'a que ½ pouce de longueur; et par 7, quand elle a de 4 à 5 pouces. Ces résultats s'expliquent facilement quand on se rappelle que l'éclat de la flamme est dû à la poussière de charbon incandescent qu'elle contient; dans une flamme plus longue, le charbon reste plus longtemps incandescent avant de se transformer en acide carbonique. Cependant si la combustion était trop lente, le charbon ne deviendrait pas incandescent, formerait de la fumée, et l'éclat serait moindre.

1890. Comparaison des intensités lumineuses des astres. — Pour comparer l'éclat du soleil à celui d'une bougie, Bouguer a commencé par affaiblir l'éclat de l'astre dans une proportion connue, en faisant passer ses rayons à travers un verre concave qui les rendait divergents. Le rapport entre l'intensité à chaque point, de la lumière arrivant sur le verre, et de celle qui était reçue sur un écran placé du côté opposé, était en raison inverse des sections du faisceau incident et du faisceau divergent à l'endroit où était placé l'écran. Ayant ainsi rendu la lumière du soleil 11664 fois plus faible, Bouguer a trouvé que l'astre étant élevé à 31° au-dessus de l'horizon, cette lumière était équivalente à celle d'une bougie placée à 43 centimètres de l'écran. L'éclat de la lune, élevée aussi à 31°, ayant été comparé à celui de la même bougie, il fut facile de conclure le rapport entre les intensités des rayons du soleil et de la lune à la surface de la terre. La moyenne d'un grand nombre d'observations a donné le nombre 300 000. Comme le soleil est environ 400 fois plus éloigné de la terre que la lune, s'il se trouvait à la même distance, son éclat serait 160 000 fois plus grand, et par conséquent égale à 300 000 × 160 000 celui de la lune.

Ayant comparé les rayons émanant des différents points de la surface du soleil, Bouguer avait pu reconnaître que l'éclat est sensiblement plus faible près des bords que dans les parties centrales. Ce résultat, nié par Lambert, a été confirmé par des expériences récentes, comme nous avons eu occasion de le dire précédemment, en parlant de la chaleur envoyée par les différents points de la surface du soleil (II, 1097).

Leslie a trouvé, au moyen de son photomètre (1886), que le soleil éclaire comme 5563 bougies à un pied de distance, nombre un peu différent de 5774 donné par Bouguer. Il trouve aussi, pour la lune, un nombre deux ou trois fois plus fort que celui de Bouguer. Les rayons de la lune n'étant pas accompagnés de chaleur sensible, Leslie comparait leur éclat à celui de la bougie, par le procédé de Celsius (1884). Il est évident que le nombre qu'il donne est beaucoup trop fort ; car, en calculant l'effet produit par les rayons solaires réfléchis vers la terre par la lune, on trouve que, pour représenter les résultats trouvés par Leslie, la totalité de cette lumière devrait être réfléchie sans perte aucune ; ce qui est évidemment impossible. Nous avons vu, d'ailleurs, combien la méthode de Leslie est incertaine. Du reste, les procédés qui exigent l'emploi d'une lumière artificielle comme terme de comparaison, lumière qu'on ne peut avoir toujours parfaitement identique, ne peuvent donner de résultats sûrs ; aussi peut-on dire que les comparaisons photométriques des lumières naturelles n'ont donné que des résultats incertains, jusqu'à l'invention du photomètre d'Arago, au moyen duquel on compare directement les intensités des étoiles et des planètes. Nous reviendrons sur ce sujet, après avoir fait connaître cet appareil ; nous aurons aussi l'occasion de décrire d'autres méthodes photométriques, quand nous ferons connaître les principes sur lesquels elles s'appuient.

1891. LOI D'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE PAR LES MILIEUX TRANSPARENTS. — On a cru d'abord que la quantité de lumière absorbée était proportionnelle à l'épaisseur du milieu traversé ; mais Bouguer a reconnu que la loi est plus compliquée. Divisons le milieu transparent en tranches infiniment minces perpendiculaires à la direction du rayon considéré, et représentons par I l'intensité de ce rayon à son entrée dans la première tranche. Soit a la fraction, supposée constante, qui représente le rapport entre la quantité de lumière qui arrive à une tranche, et celle qui la traverse sans être absorbée ; a dépend de la nature du milieu. La quantité de lumière arrivant à la première tranche étant I, celle qui parviendra à la seconde sera Ia ; la quantité qui se présentera à la troisième sera $Ia \times a = Ia^2$, et cette tranche transmettra à la suivante la quantité Ia^3, et ainsi de suite. Si donc e, équivalant à n tranches, désigne une certaine épaisseur, l'équation $i = Ia^e$, qui représente une *logarithmique*, donnera l'intensité du rayon après qu'il a traversé cette épaisseur. Les intensités du rayon forment donc une progression géométrique décroissante quand les épaisseurs forment une progression arithmétique croissante. Les quantités absorbées par les tranches successives suivent une loi semblable ; car elles sont, pour la première

tranche, $l-la=l\ (1-a)$; pour la seconde, $la-la^2=la\ (1-a)$; pour la 3e, $la^2\ (1-a)$...; ..$la^{n-1}\ (1-a)$, pour la n^e.

Nous avons supposé que la proportion de lumière absorbée par une tranche, est indépendante de l'intensité du rayon qui se présente pour la traverser. Cette supposition peut être regardée comme démontrée *à posteriori*, car les résultats calculés en l'adoptant se trouvent d'accord avec les faits. On peut, du reste, ne rien laisser à désirer dans la démonstration, en suivant la marche employée dans le cas de la chaleur (II, 737), et tenir compte aussi, comme on l'a fait alors, de la réflexion aux surfaces.

Mesure expérimentale de l'absorption. — Bouguer a fait beaucoup d'expériences pour évaluer les quantités de lumière absorbées par les milieux [1]. Voici une des méthodes qu'il a employées. Deux écrans blancs identiques *e*, *e'* (*fig.* 1403) sont éclairés par une même bougie *l* et envoient les rayons réfléchis, par deux ouvertures égales *c*, *c'*, dans l'œil placé en *o*. Les rayons venant de l'écran *e* traversent le corps transparent *c*, terminé par des faces parallèles. On éloigne l'écran *e'* jusqu'à ce que les deux surfaces *e*, *e'* paraissent de même éclat. Il est évident que, si alors les insensités lumineuses des écrans *e*, *e'*, à l'unité de distance sont *i* et *i'*, le corps aura réduit l'éclat de la lumière qui le traverse dans le rapport de *i* à *i'*, puisque l'interposition de ce corps amène les rayons de *e* à ne produire que l'effet des rayons de *e'*, qui n'ont que l'intensité *i'*. Quant au rapport de *i* à *i'*, il est donné par celui des carrés des distances *le*, *le'*. Au lieu de deux écrans éclairés, on peut employer deux bougies identiques placées en *e* et *e'*, et éclairant du papier fermant les ouvertures *c*, *c'*.

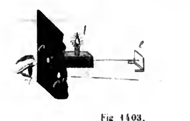


Fig 1403.

Voici quelques résultats publiés par Bouguer : l'interposition de 16 lames de verre à vitre de 21mm,43 d'épaisseur, rend la lumière 240 fois plus faible. — 6 lames de verre à glace formant une épaisseur totale de 26mm, l'affaiblissent dans le rapport de 10 à 3. — Quand la lumière traverse une masse unique dont l'épaisseur est égale à la somme des épaisseurs des lames, la perte est plus faible, de toute celle qui a lieu par réflexion aux surfaces des lames séparées. — 3m,11 d'eau de mer affaiblissent la lumière dans le rapport de 14 à 5, ou à peu près de 3 à 1.

1892. Absorption par l'air. — L'air atmosphérique absorbe une faible partie de la lumière qui le traverse ; Bouguer s'est proposé de l'évaluer. Il a d'abord mesuré, par les procédés ci-dessus (1890), l'intensité de la lumière

[1] *Traité d'optique sur la graduation de la lumière.*

du soleil au solstice d'hiver, quand il est élevé de 19°,16′ à midi, et au solstice d'été quand sa hauteur est de 66°11′. Il trouva, dans ce dernier cas, une intensité égale à environ les $\frac{4}{3}$ de ce qu'elle était dans le premier. Il calcula ensuite que, l'atmosphère étant supposée homogène et ramenée toute entière à la densité des couches inférieures, les rayons solaires auraient eu à traverser au solstice d'hiver, une couche d'air de 5872 mètres environ, et au solstice d'été, une couche de 2137ᵐ seulement. La différence d'intensité serait donc due à une couche d'air de 3735ᵐ d'épaisseur. En partant de là, et s'appuyant sur la loi de l'absorption, Bouguer trouve qu'à la surface de la terre une lumière est affaiblie de $\frac{1}{3}$ quand ses rayons traversent une couche d'air de 3 lieues et un quart.

Ayant ensuite comparé les intensités des rayons du soleil à différentes hauteurs au-dessus de l'horizon, Bouguer a trouvé les résultats suivants, en représentant par 1000 la lumière qui nous parviendrait en l'absence de l'atmosphère.

HAUTEUR.	INTENSITÉ	HAUTEUR.	INTENSITÉ.	HAUTEUR.	INTENSITÉ.
0	6	5	1201	30	6613
1	7	10	3149	40	7237
2	192	15	4535	50	7624
3	454	20	5474	70	8016
4	802	25	6136	90	8123

On voit combien est faible l'intensité près de l'horizon, ce qui explique pourquoi on peut regarder impunément le soleil dans cette position. Indépendamment des incertitudes, provenant de l'imperfection des méthodes, les résultats qui précèdent doivent être regardés comme des à peu près, particulièrement ceux qui correspondent aux faibles hauteurs, la pureté de l'air n'étant pas toujours la même, surtout près de la surface de la terre, où il est le plus souvent souillé par des brouillards ou d'autres impuretés en quantité nécessairement variable.

CHAPITRE II.

CATOPTRIQUE.

§ I. — LOIS DE LA RÉFLEXION. — POUVOIRS REFLECTEURS.

1. Lois de la réflexion.

1893. Réflexion de la lumière. — Quand un rayon de lumière rencontre la surface de séparation de deux milieux, une partie plus ou moins considérable de la lumière de ce rayon, au lieu de passer outre, revient du même côté du plan tangent à la surface. Ce phénomène porte le nom de *réflexion*, et la partie de l'optique dans laquelle on l'étudie, se nomme *catoptrique*. Euclide paraît être le premier qui ait écrit sur cette science.

La portion de lumière qui n'est pas réfléchie se partage en deux parties, l'une qui pénètre dans le second milieu, s'il est transparent, l'autre qui est éteinte ou absorbée. C'est à cause de la destruction partielle de la lumière incidente, que les rayons lancés dans un espace fermé sont aussitôt anéantis ; une partie est détruite à chacune des réflexions qu'ils subissent en allant d'une paroi à l'autre, et ces réflexions sont extrêmement nombreuses dans un temps insensible, à cause de la grande vitesse de la lumière.

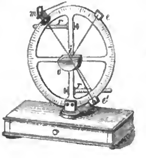


Fig. 1404.

Le *point d'incidence*, le *rayon incident* et le *rayon réfléchi*, l'*angle d'incidence* et l'*angle de réflexion*, se définissent de la même manière que pour la réflexion de la chaleur (II, 717).

1894. Lois de la réflexion. — Ces lois sont les mêmes que pour la chaleur rayonnante : 1° *L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.* 2° *Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale, sont dans un même plan.* Ces lois, connues des platoniciens, se prouvent par l'expérience, de la manière suivante : on prend un cercle divisé en degrés (*fig.* 1404), au centre duquel est placé un miroir plan perpendiculaire au plan du cercle. Ce cercle porte

deux curseurs *m* et *e* ; le premier est muni d'une plaque percée d'un petit trou, et le second, *e*, soutient un disque en papier dont le centre est marqué. Les rayons du soleil, ou d'une source artificielle, sont réfléchis par un petit miroir *m*, de manière que le mince pinceau qui passe par l'ouverture de la plaque, tombe au centre *i* du cercle ; là, elle se réfléchit, et l'on place le curseur *e* de manière que le faisceau réfléchi passe par le centre du disque. On trouve toujours une position pour laquelle cela a lieu ; ce qui prouve que le rayon réfléchi est dirigé, comme le rayon incident, dans un plan parallèle au plan du cercle, plan qui contient la normale au miroir. De plus, l'arc compris entre les deux curseurs, est partagé en deux parties égales par la normale au miroir en *i*, ce qui démontre la première loi. Dans cet appareil, on remplace souvent la plaque *m* et l'écran *e* par des tubes à canal étroit et noirci, dirigés vers le centre, et à travers lesquels on fait passer le rayon incident et le rayon réfléchi.

Ce moyen n'est pas très précis. Pour avoir une démonstration expérimentale plus satisfaisante, on emploie un cercle vertical gradué (*fig.* 1405), au centre *c* duquel tourne une lunette L*l* à réticule, et disposé comme celui du *théodolite* (I,17). Près de cet appareil est disposé un miroir horizontal *i*, formé le plus souvent par du mercure. On commence par viser avec la lunette, dans la direction *ca'*, un point lumineux très éloigné, par exemple une étoile assez voisine du pôle pour qu'elle ne se déplace pas sensiblement pendant la durée de l'expérience. Tournant ensuite la lunette dans la direction L*l*, on vise l'image du même point lumineux, vue par réflexion dans le miroir, et on l'amène au point de croisement des fils du réticule ; et comme cela est toujours possible, la seconde loi se trouve démontrée. — De plus, on remarque que les arcs *el'* et *el*, situés de part et d'autre de l'horizontale *cn*, sont égaux ; d'où l'on conclut la seconde loi. En effet, les rayons *ai* et *a'c* partant d'un point extrêmement éloigné, doivent être considérés comme parallèles ; les angles *a'cn* et *aib* sont donc égaux comme correspondants, et les angles *nci*, *cib'*, égaux comme alterne-interne. Les angles *a'cn* et *nci* étant égaux, il en est donc de même des angles *aib*, et *cib'*, et par conséquent de leurs compléments *nia* et *cin*. — La mesure des angles *a'cn* et *nci* pouvant se faire ici avec la plus grande précision, la démonstration est aussi satisfaisante que peut l'être une démonstration expérimentale.

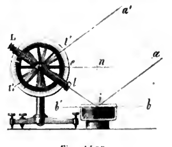


Fig. 1405.

On peut montrer aux yeux la direction des rayons réfléchis, en faisant entrer dans une chambre noire un pinceau de rayons solaires que l'on reçoit sur un miroir plan, et dont on peut suivre la marche, ainsi que celle du faisceau réfléchi, au moyen de poussières en suspension dans l'air. On peut aussi

reconnaître, par ce moyen, que, si le faisceau incident est normal au miroir, il en est de même du faisceau réfléchi, qui se confond alors avec le premier.

1895. Construction du rayon réfléchi. — Soit *am* (*fig.* 1406), le rayon incident donné. Menons le plan *mp* tangent à la surface réfléchissante au point d'incidence *m* ; d'un point quelconque *a* pris sur le rayon incident, abaissons la perpendiculaire *ap* sur ce plan, et prolongeons-la d'une quantité *pa'* égale à elle-même. Nous obtenons ainsi un point *a'* symétrique du point *a*. Joignons *a'* au point d'incidence *m*, et prolongeons *a'm*, la droite *mr* située dans le plan *amn* sera le rayon réfléchi. En effet, les obliques *ma* et *ma'* s'écartant également du pied de la perpendiculaire *mp* au milieu de *aa'*, on a $amp = a'mp = rmc$; et par conséquent $amn = rmn$; *mr* est donc bien le rayon réfléchi.

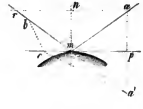
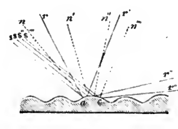


Fig. 1406.

On peut encore construire le rayon réfléchi, en abaissant du point *a* une perpendiculaire sur la normale *nm*, la prolongeant d'une quantité *nr* égale à elle-même, et joignant *rm*.

Remarque. — Le chemin parcouru par la lumière pour venir d'un point *a* à un point *b* (*fig.* 1406) après s'être réfléchie sur une surface plane *cp*, est un minimum. Car si la lumière suivait toute autre route, telle que *acb*, on aurait $am + mb = a'm + mb < a'c + cb$. On s'est autrefois appuyé sur ce résultat pour démontrer par raisonnement les lois de la réflexion, en partant du *principe de la moindre action*, ou *loi d'économie de la nature*, qui consiste à admettre que la nature atteint toujours son but par le moyen le plus simple. C'était là la marche que suivaient les anciens, notamment Héron d'Alexandrie, et aussi, d'après Vitellion, l'astronome Ptolémée.


Fig. 1407.

1896. Réflexion diffuse. — La lumière réfléchie par une surface polie est dite réfléchie *spéculairement*. Quand la surface n'est pas polie, elle réfléchit encore la lumière, mais les rayons sont renvoyés dans toutes sortes de directions. La lumière ainsi réfléchie est dite *lumière diffuse* ou *réfléchie irrégulièrement*. Cependant elle suit les lois ordinaires de la réflexion, et ce sont les innombrables aspérités qui recouvrent les surfaces non polies, qui font que les rayons réfléchis s'élancent dans une infinité de directions différentes. Soit, en effet, une surface non polie ; *s*, *s'*, *s''*, *s'''* (*fig.* 1407) des rayons parallèles tombant sur la surface courbe formée par l'aspérité *ac* et *n*, *n'*, *n''*, *n'''*

des normales aux points d'incidence; les rayons incidents donneront en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, les rayons réfléchis divergents r, r', r''. r'''. Ces rayons prolongés se rencontrent à très peu près en un même point situé à une distance insensible au dessous de la surface *éclairée*, de sorte que l'œil placé sur le trajet d'une partie de ces rayons voit le point de concours ***comme s'il était lumineux par lui-même.*** Ce raisonnement pouvant s'appliquer à tous les points d'une surface dépolie, on voit que cette surface frappée par la lumière, se comporte comme une surface lumineuse par elle-même.

Si tous les corps étaient parfaitement polis, nous ne verrions que ceux qui sont lumineux par eux-mêmes, ainsi que leur image reproduite par réflexion à la surface des autres. C'est ainsi que nous ne voyons pas une glace bien polie, et que nous n'en connaissons la présence que par le cadre qui la limite et les images qu'y forment les objets environnants. Si quelquefois on peut en distinguer la surface, c'est qu'elle est ternie, par de la poussière ou par toute autre cause, et qu'elle renvoie un peu de lumière diffuse.

Indépendamment de la faculté de réfléchir dans toutes les directions la lumière qui les frappe, une foule de surfaces dépolies possédent aussi la propriété de la renvoyer avec une couleur différente de celle de la lumière incidente. C'est de cette propriété, que nous étudierons à part (Ch. IV), que viennent les ***couleurs*** des corps.

On peut mettre en évidence la lumière réfléchie avec diffusion, en recevant dans une chambre obscure les rayons solaires, sur une surface non polie; on voit aussitôt la chambre illuminée par la lumière diffuse, dont les rayons ont la couleur qui appartient à cette surface. Les surfaces parfaitement polies ne sont pas capables de modifier ainsi la couleur de la lumière réfléchie; les rayons qu'elles réfléchissent spéculairement restent toujours de la même couleur que les rayons incidents. C'est ce qui a lieu pour les verres colorés bien polis. Si les rayons, comme ceux que renvoie une lame d'or, de laiton ou de cuivre polis sont colorés, c'est que le poli des métaux n'est jamais parfait, et qu'il se produit à leur surface, comme nous le verrons (Chap. XII), des phénomènes tout particuliers.

C'est par la lumière réfléchie avec diffusion, que l'intérieur d'une chambre est éclairé dans les points qui ne sont pas en face des fenêtres, et que l'obscurité n'est pas complète dans l'ombre portée et dans celle qui se trouve sur les corps. On nomme ***reflet*** cette illumination secondaire des corps, due aux rayons diffus renvoyés par les objets environnants. Les peintres en tirent parti, ainsi que des ombres et des pénombres, pour imiter les reliefs.

La lumière diffuse réfléchie par les corps dépolis, est le plus souvent mêlée d'un peu de lumière réfléchie spéculairement. La proportion de cette dernière augmente à mesure que les rayons incidents se rapprochent de la surface réfléchissante, ce qui se prouve de la manière suivante : on place la flamme d'une bougie très près de la surface d'une feuille de papier, d'une lame de

verre dépolie....., et l'œil étant placé à l'opposé et aussi très près de cette surface, on voit la flamme se réfléchir comme dans un miroir, en donnant une image parfaitement distincte. On explique cette influence de l'obliquité, en observant que les rayons qui rasent la surface, ne pénètrent que très peu dans les petites cavités qui séparent les aspérités, et se réfléchissent presque tous sur leur partie culminante, où se trouve un élément parallèle à la direction générale de la surface; de sorte que les normales sont, pour la plupart, parallèles entre elles.

II. Du pouvoir réflecteur.

1897. Méthodes de mesure.— La quantité de lumière réfléchie à la surface d'un corps, dépend de la nature de ce corps, de l'état de sa surface, et de l'angle que font les rayons incidents avec la normale. Bouguer, puis Fresnel et Arago, se sont particulièrement occupés de cette question. Voici une des méthodes employées par Bouguer. M (*fig.* 1408) est la surface réfléchissante; deux cartons blancs identiques *e* et *f* sont placés symétriquement par rapport au plan de M, et sont éclairés par une bougie *l* placée sur la ligne droite qui les



Fig. 1408. Fig. 1409.

joint. Un écran E empêche la lumière de la bougie de parvenir à la surface M et à l'œil placé en *o*. Les rayons réfléchis venant de *e* forment une image *e'* de ce carton, comme dans un miroir plan, et arrivent à l'œil dans la direction des rayons envoyés directement par la surface *f*. L'expérience se fait en déplaçant la bougie sur la ligne *ef*, jusqu'à ce que les deux surfaces *f*, *e'* paraissent de même teinte. Alors, le rapport des carrés des distances *lf* et *le* représente celui des intensités des rayons réfléchis et incidents venant de *e*; ce qui se démontre par le raisonnement dont on s'est servi dans le cas de l'absorption des rayons par les milieux diaphanes (1891).

Bouguer a aussi opéré avec la lumière du jour. Deux trous rectangulaires *a* et *c* (*fig.* 1409) laissent passer des faisceaux de lumière diffuse venant d'un même point du ciel. Ces faisceaux viennent converger séparément à de petites ouvertures *a'*, *c'*, derrière lesquelles se place l'observateur. L'un des faisceaux est réfléchi par la surface à éprouver, M, et les trous rectangulaires sont

disposés de manière que les chemins parcourus aMa', cc' soient égaux. On rétrécit peu à peu l'une des ouvertures a ou c, jusqu'à ce que les deux faisceaux qui passent en a' et c' paraissent de même éclat. Les intensités des faisceaux incident et réfléchi en M, sont alors en raison inverse des aires des ouvertures a et c.

1898. Résultats relatifs à la réflexion spéculaire. — Voici quelques-uns des résultats trouvés par Bouguer avec des surfaces bien polies; la quantité de lumière incidente est représentée par 100.

SUBSTANCES.	ANGLES FORMÉS AVEC LA SURFACE			
	AU-DESSOUS DE 5°.	15°	30°	60 à 90°
Eau	*Pour* 0°30' — 72	21	6,5	1,8
Verre à glace (1re surface).	5° — 54	30	11,2	2,5
Marbre noir poli	3°15' — 60	15,6	5,1	2,3
Mercure • métal des miroirs	70	»	»	60

Les glaces étamées au mercure réfléchissent, sous l'incidence de 15°, 63 pour cent de la lumière incidente, et les métaux polis, 56 pour cent.

On voit que le pouvoir réflecteur des diverses substances est très différent sous la même incidence, et que l'incidence n'a pas la même influence pour toutes. Par exemple, la proportion de lumière réfléchie diminue rapidement pour le marbre noir, à mesure que les rayons se relèvent au-dessus de la surface, tandis qu'elle varie très peu pour les métaux polis.

La lumière qui n'est pas réfléchie sur les corps opaques, est éteinte, et l'on voit qu'elle forme, dans le cas de l'incidence normale, sur le mercure et le métal des miroirs, les $\frac{2}{5}$ environ de la lumière incidente. La proportion réfléchie est beaucoup plus faible encore pour les corps transparents; une portion de la lumière pénétrant dans leur intérieur. Quand il s'agit d'une plaque terminée par deux surfaces polies, cette portion de lumière la traverse de part en part. Bouguer pensait que, même dans ce cas, une petite partie de la lumière était éteinte; mais nous verrons, en parlant des procédés photométriques d'Arago, qu'aucune partie appréciable de lumière ne disparaît, et que la somme des quantités transmises, et réfléchies aux surfaces d'entrée et de sortie, représente la totalité de la lumière incidente, quand l'absorption est insensible.

1899. Pouvoir de diffusion. — Dans le cas de la *réflexion diffuse* sur les surfaces mates, les rayons, étant réfléchis dans tous les sens, peuvent être reçus dans des directions diverses, et leur intensité dépend non seulement de la direction des rayons incidents, mais aussi de celle des rayons réfléchis que l'on observe. Par exemple, dans la direction des rayons réfléchis spéculaire-

ment, on trouve plus de lumière que dans toute autre direction. Bouguer a fait beaucoup d'expériences sur les rayons diffus reçus dans la direction même des rayons incidents. Il employait un appareil semblable à celui de la *fig.* 1403, seulement le corps transparent était supprimé, la plaque mate était placée en *e*, où l'on faisait varier son inclinaison par rapport aux rayons venant de la bougie, et l'on éloignait plus ou moins l'écran *e'* pris pour terme de comparaison, de manière à obtenir l'égalité d'éclat aux deux ouvertures *c* et *c'*. Voici quelques résultats trouvés par cette méthode. Les angles sont toujours comptés à partir de la surface, et l'on représente par 100 la quantité de lumière réfléchie suivant la normale, quand l'incidence est aussi normale :

	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Argent mat.	21	32	45	64	80	100
Plâtre....	19	35	53	64	76	100
Papier	20	33	51	75	97	100

On voit que les aspérités qui recouvrent les corps mats ne renvoient pas la lumière de la même manière dans toutes les directions. Cela a encore lieu quand l'incidence seule varie, et quand, l'incidence étant constante, on observe les rayons réfléchis dans différentes directions.

Quand on compare les différents corps, on trouve d'énormes différences dans le pouvoir réflecteur sous la même incidence. Les corps de *couleur sombre* sont ceux qui réfléchissent peu de lumière. Le noir de fumée, comme pour la chaleur, ne réfléchit pas de lumière diffuse. Le peu qu'il réfléchit est dû à la réflexion spéculaire qui se fait sur la matière grasse qui recouvre les parcelles de charbon qui le composent.

§ 2. — DE LA RÉFLEXION SUR LES SURFACES PLANES, ET DES INSTRUMENTS D'OPTIQUE QUI S'Y RAPPORTENT.

I. Des miroirs plans.

1900. Foyer virtuel des rayons réfléchis sur une surface plane. — Considérons une surface plane réfléchissante *ap* (*fig.* 1410), et un point lumineux *s*. Pour obtenir le rayon réfléchi produit par un rayon incident *si*, on construira le point *s'* symétrique du point *s*, et l'on mènera la droite *s' i*, dont le prolongement *ir* sera le rayon réfléchi cherché (1895). Comme, pour tout autre rayon incident émanant du point *s*, il faudrait faire la même construction ;

on voit que les prolongements de tous les rayons réfléchis par la surface plane, se rencontrent derrière le miroir, au point *s'* symétrique du point *s*. Le point de rencontre se nomme un *foyer*. Comme ce ne sont pas, ici, les rayons réfléchis eux-mêmes, mais seulement leurs prolongements qui s'y rencontrent, on le nomme *foyer virtuel* ou *imaginaire*.

On voit que le faisceau conserve, après la réflexion, le même degré de divergence qu'auparavant. On reconnaîtrait, de même, qu'un faisceau convergent, allant de *r* en *i*, conserve le même degré de convergence après la réflexion, et que le point de convergence *s* des rayons réfléchis, qui est alors un *foyer réel*, est symétrique du point de rencontre *s'* des rayons incidents prolongés derrière le miroir. — Si les rayons incidents sont parallèles, il en sera de même des rayons réfléchis.

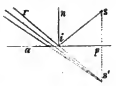


Fig. 1410.

1901. Images vues dans les miroirs plans. — On nomme, en général, *miroir*, une surface polie destinée à produire par réflexion les images des objets. Dans le *miroir plan*, les images sont vues derrière sa surface, et dans une position symétrique. En effet, soit *ac* (*fig.* 1411) un objet placé devant le miroir plan *mm*. D'après le principe précédent (1900), les rayons partant du point *a*, formeront après la réflexion, un cône dont le sommet est en *a'*, point symétrique de *a*. De sorte que l'œil placé en O, rapportant la position du point d'où émanent les rayons qui entrent dans la pupille, au sommet *a'* du cône qu'ils forment quand on les prolonge, ce point imaginaire *a'* sera vu comme s'il existait réellement (1870). On ferait la même construction pour tous les points de l'objet *ac* ; son image *aa'* est donc placée symétriquement derrière le miroir.

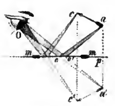


Fig. 1411.

On peut construire facilement le rayon incident qui, partant d'un point de l'objet, fournit les rayons réfléchis qui entrent dans l'œil. Considérons par exemple le point *a*, il suffira de joindre le point *a'* aux bords de l'ouverture de la pupille, et de joindre au point *a*, l'intersection *oo'* du cône ainsi formé avec la surface du miroir ; *aoo'* sera le pinceau incident cherché. Ce pinceau ne sera plus le même si l'œil change de place, mais le lieu de l'image *a'c'* est indépendant de la position de l'œil. On comprend aussi que l'on pourra voir l'image du point *a*, même quand il sera en dehors de la limite *m* du miroir, à la condition que l'œil sera suffisamment éloigné, du côté opposé.

Champ du miroir. — Si, du point *a'*, on mène une ligne droite qui touche le bord du miroir, et qu'on la fasse tourner en suivant le contour *mm*, elle engendrera un cône dans l'intérieur duquel l'œil devra être placé pour apercevoir l'image *a'* du point *a*. L'espace limité par la surface de ce cône, se nomme le *champ* du miroir, pour le point *a*. On voit que le champ est d'autant moins

étendu que le miroir est plus petit, et que le point *a* est plus éloigné de sa surface et de la perpendiculaire en son milieu.

1902. Miroirs de glace étamée. — L'usage des miroirs remonte à l'antiquité la plus reculée. D'après l'Exode, les femmes d'Israël se servaient de miroirs d'airain. Les anciens en faisaient en bronze, en étain, en fer bruni, en or, en argent. Ces derniers, d'après Pline, étaient d'un usage vulgaire chez les Romains. On en faisait aussi avec diverses pierres précieuses, comme l'émeraude ; avec les jaspes, l'obsidienne. Les anciens Péruviens fabriquaient des miroirs avec cette dernière substance et d'autres pierres dures, et l'on en trouve encore de temps à autre dont le poli s'est bien conservé. Aujourd'hui, on emploie sous le nom de *miroirs à glace*, ou simplement de *glaces*, des miroirs plans formés d'une lame de verre, derrière laquelle est appliquée une mince couche d'amalgame d'étain, dont le pouvoir réfléchissant est considérable. Cette invention est attribuée aux habitants de Sidon, avant le VI[e] siècle. D'abord, on ne put faire que de petits miroirs, à cause de la difficulté d'obtenir de grandes feuilles de verre planes. Les Vénitiens arrivèrent bientôt à des dimensions remarquables, par le procédé du soufflage ; mais les glaces n'étant pas parfaitement planes, les images étaient déformées. Enfin, en 1688, A. Thévart imagina les glaces coulées, qu'on obtient en versant sur une table en fer, une couche de verre fondu que l'on polit ensuite sur les deux faces. Il y a quelques années, M. Drayton a imaginé de remplacer l'amalgame, par une couche d'argent déposée par procédé chimique.

Les miroirs de glace étamée ou argentée sont bien préférables aux miroirs métalliques sous le rapport de la quantité de lumière réfléchie et de la conservation du pouvoir réfléchissant. Mais ils présentent un grave inconvénient quand on les emploie aux expériences d'optique, parce que, la lumière se réfléchissant non seulement à la surface postérieure du verre, sur la couche d'amalgame, mais encore sur la surface antérieure, chaque rayon incident donne plusieurs rayons réfléchis, de manière que chaque point lumineux fournit plusieurs images. Comme la *réfraction* joue un rôle dans ce phénomène, nous y reviendrons dans le chapitre suivant.

1903. APPLICATIONS DIVERSES DES MIROIRS PLANS. — On a fait une foule d'applications des miroirs plans, soit pour renvoyer la lumière dans une direction donnée, soit pour produire des images permettant de voir les objets dans une direction différente de celle où ils se trouvent. Depuis quelques années, on emploie sous le nom de *réflecteurs Troupeau* de grands miroirs étamés, pour renvoyer horizontalement dans les galeries souterraines, dans les caves..., la lumière qui arrive verticalement par des soupiraux. Dans les pays du Nord, on dispose en dehors des fenêtres, des miroirs inclinés nommés *espions*, dans lesquels on voit l'image des objets extérieurs placés au loin, à droite et à gauche de la fenêtre, sans avoir besoin de l'ouvrir,

Mesure des hauteurs. — Un petit miroir plan *e* (*fig.* 1412) est placé horizontalement sur le sol. On s'éloigne peu à peu, de manière à voir

l'image c' du point le plus élevé de l'objet *ac* dont on veut mesurer la hauteur, et l'on dispose une régle verticale *no* qui donne la hauteur de l'œil au-dessus du sol. On mesure les distances *ne* et *ae*, et les triangles semblables *one*, *cae* donnent $ca : no = ae : ne$; d'où l'on tire la valeur de *ca*.



Fig. 1412.

Miroir magique — En combinant plusieurs miroirs, on produit divers effets curieux. Le *miroir magique* consiste en un miroir plan incliné *n* (*fig.* **1413**) combiné avec un autre miroir incliné *m*, de manière à faire voir par double réflexion, à un observateur placé en *o*, des objets situés en *ab* derrière un mur *cc'*. Considérons en particulier le point *a*; son image dans le miroir *m*, sera *a'*, point symétrique de *a* par rapport au plan *pm* de ce miroir. Les rayons réfléchis se trouvant dans le même cas que s'ils partaient du point *a'*, donneront, en se réfléchissant sur le miroir *n*, une nouvelle image *a"* que l'on construit en menant *a'q* perpendiculaire au plan *nq* du miroir *n*, et prenant *qa''* égale à *a'q*. Un observateur placé en *o* verra donc en *a''b''* une image de *ab*.

Pour construire le pinceau qui, partant du point *a*, entre dans l'œil placé en *o*, on joint l'image *a''* aux bords de la pupille, puis le point *a'* aux différents points de l'intersection du pinceau conique *a''o* avec le miroir *n*, puis enfin le point *a*, à l'intersection du cône *na'* avec le miroir *m*. On obtient ainsi le pinceau *amno* qui entre dans l'œil. Les astrologues employaient cet artifice pour montrer aux spectateurs placés en *o* différentes scénes disposées à l'avance dans une chambre ignorée, placée derrière le mur *cc'*. Des draperies *d*, cachaient le miroir supérieur *m*.

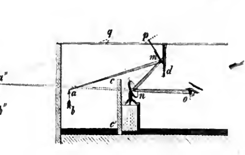


Fig. 1413.

Polémoscope. — Le Polémoscope d'Hévélius, destiné à observer au loin en temps de guerre, tout en restant à l'abri derrière un parapet, est une combinaison de miroirs semblables à *m*, *n* (*fig.* 1413); *ab* serait l'objet à observer; *cc'*, l'obstacle préservateur, et *o* l'œil de l'observateur. On dispose souvent en avant de chacun des miroirs, les verres lenticulaires qui terminent les lunettes grossissantes, de manière à mieux distinguer les objets éloignés.

Lunette magique. — Au moyen de quatre miroirs inclinés à 45° sur l'axe

d'une lunette *mm'* (*fig.* 1414), on peut voir au loin, malgré l'interposition d'un corps opaque *n*; les rayons suivent la route *m'oecam*, en se réfléchissant sur les quatre miroirs *o*, *e*, *c* et *a*. La distance des verres de la lunette, placés en *m'* et *m*, est alors égale à la longueur absolue *maceom'*.

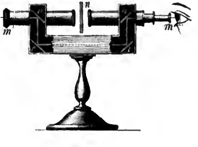


Fig. 1414.

1904. Mouvements relatifs du miroir et du rayon réfléchi. — Quand un miroir *ab* (*fig.* 1415) tourne autour d'un axe, perpendiculaire au plan d'incidence, le rayon réfléchi se déplace d'une quantité angulaire double de celle dont tourne le miroir. En effet, considérons le rayon incident *so*, le rayon réfléchi *or*, et soit *on* la normale. Quand le miroir tournera de la quantité α et viendra en *a'b'*, la normale tournant de la même quantité, l'angle d'incidence diminuera de α, et il devra en être de même de l'angle de réflexion. Le rayon réfléchi se rapprochera donc de la normale, de la quantité α, et par conséquent, se rapprochera du rayon incident, de la quantité 2α. — Si le mouvement de rotation du miroir avait lieu en sens contraire, il est facile de voir que la normale s'écartant du rayon incident, le rayon réfléchi s'en écarterait d'une quantité double.

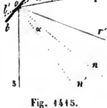


Fig. 1415.

1905. Déviation d'un rayon réfléchi sur deux miroirs inclinés. — Quand un rayon de lumière *sm'* (*fig.* 1414) se réfléchit sur deux miroirs *m*, *m'* faisant entre eux un angle $m'pm = p$, et quand le plan d'incidence est perpendiculaire à la ligne d'intersection des miroirs, l'angle $scm = c$ du rayon incident et du second rayon réfléchi *mr*, est égal au double de l'angle des miroirs. En effet, en appelant *i* les angles d'incidence et de réflexion sur le miroir *m*, et *i'* les mêmes angles sur le miroir *m'*, on a dans le triangle *mcm'*, l'angle extérieur $sm'm = 2i' = c + 2i$; d'où $c = 2(i' - i)$ ou $c = 2p$, car le triangle *m'pm* donne l'angle extérieur $m'ma = 90° - i = p + 90° - i'$, d'où $i' - i = p$.



Fig. 1416.

1906. — Sextant. — Cet instrument, destiné à mesurer la distance angulaire de deux points éloignés, est une application du principe précédent. Il consiste en un secteur AB (*fig.* 1417), dont l'arc, divisé en *demi-degrés*,

forme à peu près le sixième de la circonférence ; d'où le nom de *sextant*. Une alidade mobile au centre du secteur, porte un vernier *v* et peut être déplacée lentement au moyen d'une vis de rappel *uu'*, qui prend son écrou dans une pince *p* que l'on fixe à l'arc avec une vis de pression ; *l* est une loupe que l'on amène au-dessus du vernier. Un miroir *m*, dont le plan prolongé passe par le zéro du vernier, est fixé perpendiculairement à l'alidade et tourne avec elle autour du centre du secteur. Un second miroir *n*, parallèle au rayon *o*B qui passe par le zéro de l'arc gradué, est fixé perpendiculairement au plan de l'instrument et sur le côté opposé à ce rayon. Ce miroir, représenté à part en MN, n'est étamé que sur la moitié N la plus rapprochée du secteur. L est une petite lunette à micromètre, dirigée vers le miroir *n*, et fixée du côté opposé. Cette lunette est mobile dans un plan perpendiculaire au secteur. On la remplace assez souvent par un simple tube qui détermine la direction suivant laquelle on doit regarder. Enfin, une poignée P, fixée parallèlement derrière le secteur, sert à le tenir à la main pour le placer de manière que son plan passe par les deux points dont on veut mesurer la distance angulaire.

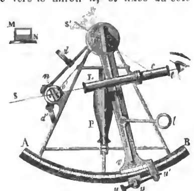


Fig. 1417.

Supposons que ces deux points soient deux étoiles situées dans les directions *s*, *s'*; on verra d'abord, avec la lunette L et à travers la partie non étamée du miroir *n*, l'une des étoiles, *s*, puis on fera tourner l'alidade *ov* jusqu'à ce que le rayon *s'oo'e*, réfléchi successivement par les deux miroirs et venant de la seconde étoile *s'*, arrive dans la lunette L et se confonde avec le rayon direct venant de l'étoile *s* ; ce qui a lieu quand les deux points lumineux paraissent coïncider. Alors l'angle cherché *scs'* n'étant autre chose que l'angle du rayon incident *s'o* avec le rayon réfléchi *o'c*, est le double de l'angle des deux miroirs. Or, cet angle est mesuré par l'arc B*v* ; la distance angulaire cherchée est donc représentée par un nombre de degrés égal au nombre de *demi-degrés* compris dans cet arc.

Quand la lumière de l'un des points est trop vive, comme lorsqu'il s'agit du soleil, on en diminue l'éclat au moyen de disques de verre coloré *d*, *d'*, montés dans des anneaux à charnière, et que l'on peut amener dans le trajet du rayon réfléchi *oo'*, ou du rayon direct *sn*.

Le principe du sextant est dû à Hooke, en 1664, mais il n'employait qu'une seule réflexion. Newton proposa ensuite un instrument analogue perfectionné, et enfin, en 1731, Hadley, qui ignorait les essais faits antérieurement, publia sous le nom d'*octant*, parce que le secteur ne comprenait que 45°, l'instru-

ment que nous venons de décrire. Le principe de cet instrument paraît, au reste, avoir aussi été trouvé vers la même époque par plusieurs autres ; mais, comme Hadley est le premier qui en ait fait construire, et qui ait montré la grande utilité qu'il présente pour la navigation, il passe à bon droit pour l'inventeur. L'usage de cet instrument a constitué, en effet, un progrès immense dans l'art nautique, en permettant de mesurer en mer les distances angulaires, malgré les mouvements du navire, parce qu'il ne s'agit que d'établir une coïncidence entre deux points.

1907. Images multiples formées par deux miroirs plans parallèles. — Soient deux miroirs plans parallèles *mn* et *pc* (*fig.* 1418) et o un point lumineux placé entre ces deux miroirs. Le point o fera une première image *o'* dans le miroir *mn*, à une distance *no'* égale à *no*. Les rayons réfléchis sur *mn* rencontreront *pc*, et comme ils sont dans le même cas que s'ils partaient du foyer virtuel *o'*, ils formeront en *o''*, à une distance *co''* = *co'*, une image de *o'*. De même, les rayons réfléchis sur *pc* rencontrant le miroir *mn* de la même manière que s'ils partaient du foyer virtuel *o''*, donneront une troisième image *o'''*, à une distance *no'''* égale à *no''*, et ainsi de suite. Il y aura donc un nombre infini d'images; mais comme à chaque réflexion il y aura une perte de lumière, ces images seront de plus en plus faibles et finiront par n'être plus distinctes. Si l'on veut construire le pinceau qui, entrant dans l'œil, fait voir l'image o^{IV}, on joindra ce point aux bords de la pupille; puis, au point o''', l'intersection *p* avec le miroir *pc*, du pinceau conique ainsi obtenu ; l'intersection *q* au point o''; l'intersection *r* au point o' ; et enfin l'intersection *t* au point lumineux o. On obtiendra ainsi le pinceau brisé *otrqp*, qui, entrant dans l'œil, fait voir l'image o^{IV}.

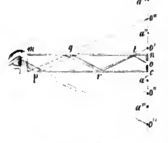


Fig. 1418.

Indépendamment de la série d'images o', o'', o'''..., il se produit une autre série *a'*, *a''*, *a'''*... d'images intercalées entre les premières, et qui sont formées par les rayons qui, partant de o, se réfléchissent d'abord sur le miroir *pc*, au lieu de commencer par le miroir *mn*. Il est facile de voir que, si le point o est à égale distance des deux miroirs, les images consécutives appartenant indifféremment aux deux séries, seront équidistantes et à des distances égales à celles des miroirs. — On a souvent occasion d'observer la multiplicité d'images dont nous venons de parler; par exemple, quand, dans un salon, deux glaces sont parallèles et opposées. Si l'on veut distinguer les unes des autres les images appartenant aux deux séries, on n'a qu'à employer un corps présentant à chacun des miroirs une face de couleur différente.

Au lieu de deux miroirs plans, considérons un tube poli en dedans, et fermé par un disque opaque percé à son centre *o* (*fig.* 1418) ; deux arêtes opposées

du tube, se comportant comme deux miroirs linéaires parallèles, donneront les deux séries d'images, et comme il en est de même pour deux arêtes quelconques opposées, on verra dans le tube, des circonférences concentriques d'autant plus brillantes que leur diamètre sera plus petit. Si le trou n'est pas sur l'axe du tube, les circonférences seront remplacées par des courbes d'autant plus allongées que le trou sera plus éloigné du centre.

1908. Images multiples produites par deux miroirs qui se coupent. — Quand les deux miroirs forment un angle, il se produit encore deux séries d'images, et il est facile de voir qu'elles sont toutes situées sur une circonférence passant par le point lumineux et ayant son centre à l'intersection des miroirs. En effet, soient AO et BO (*fig.* 1419) les deux miroirs, et *s* le point lumineux. L'image de ce point dans le miroir AO sera le point symétrique *s'*, et *ss'* sera la corde d'une circonférence ayant son centre en O. Le point *s'* pouvant être considéré comme le point de départ des rayons réfléchis par AO, donnera l'image *r'* sur le second miroir, et *s'r'* sera aussi une corde de la circonférence. De même, le point *r'*, considéré comme centre de rayonnement, donnera l'image *s''* dans le miroir AO; et *s''* donnera l'image *r''* dans OB, images situées sur la même circonférence.

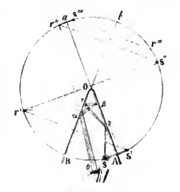


Fig. 1419.

Il est facile de voir que les images successives *s'*, *s''*, *s'''*... se rapprochent de plus en plus de la ligne AO*a*. De même, les images *r'*, *r''*... se rapprochent de plus en plus de la ligne BO*b*. On arrivera donc à une image tellement rapprochée de ces lignes, que le point symétrique que l'on construira pour avoir l'image suivante tombera dans l'angle *a*O*b*. C'est ce qui a lieu pour l'image *r''* qui donne le point symétrique *s'''*. Alors, les rayons réfléchis qui forment le point *s'''* par leur rencontre, ne pourront plus donner de nouveaux rayons réfléchis, parce que ce point *s'''* se trouve derrière chacun des miroirs. Il est évident, en effet, qu'un foyer virtuel ne peut donner de rayons réfléchis sur un miroir, qu'autant qu'il se trouve du côté de la face réfléchissante, puisque les rayons marchent comme s'ils émanaient de ce foyer. L'image *s'''* sera donc la dernière. Le nombre d'images ne peut donc pas être infini; dans le cas de la figure, il n'y en a que cinq.

Pour construire le pinceau qui, entrant dans l'œil *o*, fait voir une des images, par exemple *r''*, on joindra *r''* aux bords de la pupille, puis l'intersection α du pinceau *r''o* avec OB, au point *s''*; l'intersection β du cône $\alpha s''$, au point *r'*; l'intersection γ, au point *s'*; et enfin, l'intersection δ, au point *s*. On obtiendra ainsi le pinceau brisé $s\delta\gamma\beta\alpha o$ qui fait voir l'image *r''*.

On pourrait faire une semblable construction pour le point s''', en supposant l'œil très près de AO. Mais elle est impossible pour r''', point symétrique de s'''; car, en menant une ligne droite, de r''' à l'œil placé en un point quelconque dans l'angle AOB, on reconnaît qu'un rayon venant de r''' en o ne frapperait pas la face réfléchissante du miroir OB, sur lequel les rayons émanant de s''' devraient se réfléchir pour former une nouvelle image. s'' sera donc bien la dernière de la série formée par les rayons qui tombent d'abord sur le miroir AO, comme nous l'avons reconnu plus haut.

Il existe une autre série d'images, produites par les rayons qui tombent d'abord sur le miroir BO, et ces images sont toutes situées sur la demi-circonférence *Bab*, pour le miroir BO, et *Aba*, pour le miroir AO.

1909. Nombre des images. — Ce nombre augmente à mesure que l'angle des miroirs est plus petit, et il devient infini quand l'angle est nul, c'est-à-dire quand les miroirs sont parallèles, comme nous l'avons déjà vu plus haut (1907). Voici à peu près comment M. A. Bertin trouve le nombre des images[1]. Considérons d'abord les images des miroirs eux-mêmes; pour les obtenir, il suffira de trouver celles des extrémités A et B (*fig.* 1420). Les images A', B'', A''', faites dans le miroir BO, seront situées sur la demi-circonférence *Bab*; et les images B', A'', B''', faites dans le miroir AO, sur la demi-circonférence *Aba*. Les images des miroirs partagent le cercle en secteurs égaux, dont les deux derniers B''OA''', A''OB''' se superposent en partie ou laissent entre eux un certain espace, toutes les fois que l'arc BA n'est pas une partie aliquote de la circonférence, et se suivent sans se superposer, dans le cas contraire. Un point *s*, placé entre les deux miroirs, formera deux séries d'images. Celles qui sont produites par la réflexion sur AO seront toutes situées sur la demi-circonférence *Aba*, et celles qui sont produites par la réflexion sur BO, dans la demi-circonférence *Bab*. Chaque secteur contiendra une de ces images. L'une des deux séries correspond au cas où la première réflexion se fait sur le miroir AO, et l'autre, au cas où elle se fait d'abord sur le miroir BO.

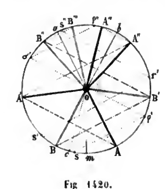


Fig 1420.

Cela posé, considérons les divers cas qui peuvent se présenter. En général, l'arc BA, que nous appellerons 2α, est compris un certain nombre de fois, n, dans la circonférence, avec un reste 2β; de sorte que l'on a $\pi = n\alpha + \beta$. n peut être pair ou impair, et le reste β peut être nul ou ne l'être pas.

1° n PAIR. — Pour fixer les idées, supposons $n = 6$ (*fig.* 1420). Les images des miroirs et les miroirs eux-mêmes AO, BO forment alors *sept*

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIX, p. 257.

secteurs, dont les deux derniers A''B''', B''A''' se superposent en partie, puisque 2α, plus grand que $\frac{1}{7}\pi$, est moindre que $\frac{1}{6}\pi$; et les arcs A''A''', B''B''' sont égaux à 2β. Le milieu *m* de l'arc AB donnant une image au milieu de chaque secteur, il y aura aussi *sept* images, ou, en général, $n+1$ en comptant le point lui-même comme on le fait toujours. Le nombre d'images de tout autre point situé dans le demi-arc *m*B ou *m*A, dépend de sa position sur cet arc. Prolongeons A'''O, suivant O*c*; on aura B*c* = A'''*b* = β. Les images du point *c* seront toutes à des distances des images du miroir BO, égales à β; la troisième image de la série commençant par la réflexion sur le miroir BO, viendra donc en *a* sur le prolongement de AO et ne pourra plus produire de nouvelle image. Il en sera de même *à fortiori* de tout point, tel que *s*, situé sur l'arc *cm*. L'image *s''* sera donc la dernière, puisqu'elle tombe dans l'angle *a*O*b* des miroirs. Un point situé sur l'arc B*c* donnant la troisième image sur l'arc *a*B'', en dehors de l'angle *a*O*b*, pourra fournir une quatrième image. — Quant aux images faites en commençant par le miroir AO, elles seront seulement au nombre de *trois*, le point *s* étant éloigné de ce miroir d'une quantité plus grande que β. Il y aura donc en tout *six* images pour les points situés en *cm*, et $6+1$ pour ceux situés sur l'arc B*c*, ou, en général, en comptant le point *s*, *n* images pour les premiers, et $n+1$ pour les seconds.

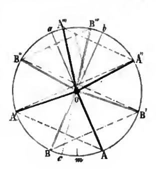


Fig. 1421.

Supposons maintenant que *n* étant toujours pair, l'arc AB soit une partie aliquote de la circonférence; on aura $\pi = n\alpha$, et β étant nul, les deux secteurs B''OA''', A''OB''' se confondront, ainsi que les images du point *m* qu'ils contiennent. Il y aura donc *six* images des miroirs, ainsi que du point *m*. Le point *c* se confondant avec le point B, il en sera de même des images *s''* et ρ'' du point *s*. Car si l'on a B''*s''* = B*s*, on a aussi A''ρ'' = A*s*; la différence *s''*ρ'' disparaît donc quand les secteurs se confondent. Il y a donc en général *n* images des miroirs en les comptant eux-mêmes, et *n* images d'un point quelconque *m* ou *s*.

2° *n* IMPAIR. — Supposons, pour fixer les idées, que l'on ait $\pi = 7\alpha + \beta$. Il y aura d'abord huit images des miroirs, A, A', A'', A''', et B, B', B'', B''' (*fig.* 1421), et le cercle contiendra *sept* secteurs égaux, plus un petit secteur A'''OB''' dont l'arc A'''B''' est égal à 2β; car, si 2β devenait nul, les deux images OA''', OB''' devraient se confondre, pour que le cercle fût divisé en sept secteurs égaux. Il y a donc *huit* images des miroirs, en les comptant eux-mêmes, ou, en général, $n+1$. Le point milieu donnera une image dans chacun des *n* secteurs, ce qui fera $n+1$ en le comptant lui-même. Mais il y aura de plus deux autres images sur l'arc *ab*; car les images qui tombent au milieu

des arcs B″A‴ et A″B‴ sont nécessairement en dehors de ab; $A'''a = B'''b$ étant moindre que $\frac{1}{2}$ AB, autrement A‴B‴ serait nul, puisque $ab =$ AB. Il y aura donc en tout *neuf* images du point m, ou, en général, $n+2$. Si maintenant nous considérons un point situé sur l'arc cm, on verra facilement que ce point donne aussi $n+2$ images, les images qui tombent sur les arcs B″A‴, A″B‴ étant en dehors de l'arc ab et en fournissant chacune une nouvelle. Les points situés sur l'arc Bc ne donneront que $n+1$ images, celles qui tombent sur les arcs B″A‴, A″B‴ étant comprises dans l'arc ab.

Si l'on a $\beta = 0$, les images OB‴, OA‴ des miroirs se confondent, et il n'y en a plus que n. Le point c se confond avec B, et tout point situé sur l'arc AB forme $n+1$ images, car il y en a toujours deux dans l'arc ab, à moins qu'il ne s'agisse du point milieu m, auquel cas ces deux images se confondent en une seule, et il n'y en a plus que n.

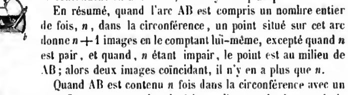


Fig. 1422.

En résumé, quand l'arc AB est compris un nombre entier de fois, n, dans la circonférence, un point situé sur cet arc donne $n+1$ images en le comptant lui-même, excepté quand n est pair, et quand, n étant impair, le point est au milieu de AB; alors deux images coïncidant, il n'y en a plus que n.

Quand AB est contenu n fois dans la circonférence avec un reste 2β, pour tout point situé à une distance de chaque miroir plus grande que β quand n est pair, et plus petite quand n est impair, il y a $n+1$ images, en comptant le point lumineux; et il y en a $n+2$ quand ce point est à une distance plus petite ou plus grande que β, suivant que n est pair ou impair.

Vérifications par l'expérience. — Tous ces résultats peuvent se vérifier au moyen de deux miroirs A et B (*fig.* 1422) réunis par une charnière horizontale, et dont on peut faire varier l'angle, qui est mesuré sur l'arc ab. L'objet qui doit former les images est fixé entre deux lames de verre soutenues par l'anneau métallique an. Si l'on regarde par un petit trou, pratiqué dans la plaque ab près de l'angle des miroirs, on voit un espace circulaire divisé en secteurs, dans lesquels se trouvent les images de l'objet, disposées sur une même circonférence ayant son centre en un point de l'intersection des miroirs. Si l'angle est de 90°, on a quatre images; il y en a six, s'il est de 60°; trois, s'il est de 120°, etc.

1910. Applications. — On a imaginé divers instruments d'optique montrant les effets de la réflexion sur plusieurs miroirs.

Kaléidoscope. — Le *kaléidoscope* de M. Brewster consiste en un tube de carton dans lequel sont disposés deux miroirs a, b; a', b' (*fig.* 1423) formant une espèce de gouttière. En cd est une boîte fermée par deux lames de verre v, v', dont l'extérieure, v', est dépolie, et dans laquelle on place de petits corps de formes et de couleurs diverses; par exemple, des fragments de verre coloré. Quand on regarde par l'ouverture o, on voit les images de ces objets former des figures symétriques, dont on peut varier la disposition en changeant les posi-

tions relatives des corps, par quelques secousses. Une vis n, n' sert à faire varier l'angle des miroirs. L'instrument de la figure 1422 n'est autre chose qu'un kaléidoscope *à angle variable*. Les dessinateurs pour les tissus imprimés se servent souvent de ces instruments pour y trouver des combinaisons et des effets.

Caisses catoptriques. — Si au lieu de deux miroirs, on en emploie trois ou un plus grand nombre formant un prisme, on a ce que l'on nomme une *caisse catoptrique* (*fig.* 1424). Ordinairement, le prisme se place verticalement, et la base supérieure est fermée par une lame de verre dépolie ou par une membrane. On regarde dans l'intérieur de la caisse, par de petites ouvertures, *o*, pratiquées dans le haut de chaque miroir, et l'on voit les objets placés dans l'intérieur, reproduits un très grand nombre de fois dans un espace beaucoup plus grand que celui qu'occupe l'instrument, et même dans un espace infini quand il y a deux miroirs opposés et parallèles (1907). Au



Fig. 1423. Fig. 1424.

moyen d'une caisse à six miroirs, dans laquelle on dispose de petits modèles d'arbres, de navires ou de soldats, l'on voit par les réflexions multiples, une immense forêt, une flotte innombrable ou toute une armée, occupant un espace qui dépasse énormément l'étendue de la caisse.

Le champ de vue présente une distribution symétrique, toutes les fois que la base du prisme formé par les miroirs est un polygone régulier. Mais cette condition n'est pas toujours nécessaire. Par exemple, dans le cas de trois miroirs seulement, le champ est partagé symétriquement toutes les fois que chacun des angles est une partie aliquote de quatre angles droits ; ce qui ne peut avoir lieu que lorsque le triangle de base est équilatéral, ou qu'il est droit et isocèle, ou, enfin, droit avec l'un des angles aigus égal à 30°, et l'autre à 60°.

En disposant convenablement des glaces dans une chambre, on peut en faire une véritable caisse catoptrique, dans laquelle les images des objets, et surtout des lumières, se multiplient de manière à produire des effets merveilleux.

1911. Marche d'un rayon lumineux suivant une ligne courbe. — A la réflexion sur plusieurs miroirs se rattache une expérience curieuse dans laquelle on peut faire suivre une ligne courbe, à un rayon de lumière. Voici comment M. Plateau fait cette expérience. On prend une bande métallique bien polie, courbée partout dans le même sens, c'est-à-dire sans qu'il y ait

de points d'inflexion. On fait tomber très obliquement du côté concave, un mince pinceau de rayons solaires, qui se réfléchit, va rencontrer de nouveau la surface concave, s'y réfléchit une seconde fois, puis une troisième..., et forme ainsi un polygone inscrit dans la courbe. Plus le rayon incident est rapproché de la surface, plus les côtés du polygone sont petits et nombreux. Si donc le rayon incident est dirigé tangentiellement à la surface courbe, les côtés du polygone seront infiniment petits, et le pinceau lumineux formera une courbe continue appliquée sur celle que forme le ruban métallique. Ce résultat se vérifie par l'expérience; on peut suivre la marche de la courbe lumineuse, sur une feuille de papier sur laquelle est posée la bande métallique, ou bien en approchant normalement de cette bande un petit écran de papier au point où l'on veut vérifier le passage des rayons. Le pinceau courbe redevient rectiligne à l'extrémité de la bande, et la quitte dans la direction de la tangente. Ce phénomène curieux peut être rapproché de celui que produit le son, qui suit les contours des gouttières formant une courbe concave (I, 528).

M. Babinet avait fait, antérieurement, des expériences qui l'avaient aussi conduit à diriger un rayon suivant une ligne courbe continue *quelconque*. Il faisait entrer le pinceau lumineux dans une veine liquide, en le faisant tomber de dedans en dehors, et normalement à la paroi du vase, à travers l'orifice de sortie. Le pinceau restait emprisonné dans la veine, en se réfléchissant sur les parois internes, d'après leur courbure. Ce n'était qu'au moment où la veine se brisait contre un obstacle, que l'on voyait la lumière rejaillir avec le liquide, impuissant dès lors à la retenir. — M. Babinet a vu aussi des baguettes de verre courbées d'une manière quelconque, conduire un pinceau de lumière d'une de leurs extrémités à l'autre. Cette lumière, affaiblie par l'absorption du verre, sortait avec une teinte verdâtre, et ressemblait beaucoup à celle des corps phosphorescents.

Ce curieux phénomène fournit un moyen de conduire la lumière par une route sinueuse quelconque, en un point que l'on veut éclairer. Au lieu d'une baguette de verre massive, on peut employer avec avantage un tube de verre, dont on noircit la surface extérieure.

M. Colladon a employé un moyen analogue pour éclairer une veine liquide, de manière à en montrer la structure. La lumière est lancée dans la veine, de dedans en dehors, au moyen d'une lentille adaptée à la paroi du vase opposée à l'orifice, au centre duquel elle rassemble les rayons solaires en un foyer, où ces rayons se croisent de manière à entrer dans la veine en formant avec ses parois des angles très petits. Il en résulte qu'ils se réfléchissent *totalement*, comme nous le verrons (chap. III), et ils suivent la courbure de la veine, en éprouvant de nombreuses réflexions. La veine, à peine visible, s'éclaire d'une vive lumière là où elle se divise en gouttes, ou quand elle se brise contre un obstacle. Si l'on imprime quelques secousses au vase, il se forme dans la partie limpide, des fissures, qui laissent échapper une lumière très brillante. Si l'eau est trouble, la veine devient visible, à cause de la lumière réfléchie par les parcelles en suspension.

II. Goniomètres de réflexion.

1912. Les *goniomètres* sont des instruments destinés à mesurer les angles dièdres, particulièrement ceux des cristaux. Nous n'avons à nous occuper ici que de ceux dans lesquels on emploie la réflexion ; car, les faces des cristaux étant le plus souvent très brillantes, on a pu utiliser leur pouvoir réflecteur pour mesurer leurs angles avec une grande précision.

1913. Goniomètre de Wollaston. — Cet instrument permet de mesurer les angles de très petits cristaux, à une minute près. Il consiste en un cercle vertical CC (*fig.* 1425), gradué sur la tranche et que l'on peut faire tourner sur lui-même, en agissant sur la tête *t* fixée à un arbre horizontal porté par le pied de l'instrument. Un vernier fixe *v* permet de mesurer l'angle de rotation. L'arbre est traversé suivant son axe, par une tige munie d'un bouton *b*, qui peut tourner sur elle-même indépendamment du cercle gradué. Cette tige supporte du côté opposé, par l'intermédiaire de pièces articulées *cno*, une petite palette *o* sur laquelle on fixe, avec de la cire, le cristal *a*. Le mouvement de la pièce *cn* autour de l'axe c parallèle au cercle, et celui de la pièce *no* sur elle-même, permettent de diriger l'arête du cristal perpendiculairement au plan du cercle. On fait aussi en sorte que le prolongement de cette arête passe par le centre de l'instrument. Cela fait, et le zéro de la division du cercle CC coïncidant avec celui du vernier, on fait tourner le cristal au moyen du bouton *b*,

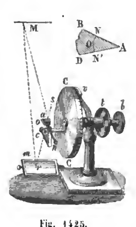


Fig. 1425.

sans déranger le cercle, de manière à voir par réflexion sur une de ses faces, l'image d'une mire horizontale très éloignée M ; par exemple, le bord inférieur ou l'un des barreaux d'une croisée ; et l'on amène l'image de cette mire à coïncider avec une seconde mire horizontale vue directement dans la direction *sr*, ce qui a lieu quand le rayon réfléchi *as* se confond avec le rayon *ra* venant directement de la seconde mire. Celle-ci peut être le bord d'une feuille de papier posée sur la table. On la remplace avec avantage par l'image de la première mire, réfléchie dans un miroir horizontal *m* fixé au pied de l'instrument. De cette façon, la position de la face du cristal est parfaitement déterminée. On fait ensuite tourner le cercle CC, en agissant sur la tête *t*, de manière à obtenir la même coïncidence au moyen de la seconde face du cristal, et l'on mesure, au moyen du vernier, l'angle dont il a fallu faire tourner le cercle. Le supplément de cet angle est égal à l'angle du cristal. En effet, pour amener la surface *extérieure* d'une des faces, à la place de l'autre, il faut que la normale ON'

à la première vienne prendre la place de la normale ON à la seconde; le cristal doit donc tourner d'une quantité égale à l'angle NON' des normales, qui est le supplément de l'angle A des deux faces. Ordinairement, la graduation est établie de manière à donner immédiatement ce supplément.

Pour obtenir une bonne mesure, il faut plusieurs conditions. 1° Le plan du cercle gradué doit être bien perpendiculaire aux mires horizontales. 2° Il faut que l'arête du cristal soit exactement perpendiculaire au plan du cercle; on reconnaît que cette condition est remplie quand les deux mires peuvent coïncider dans toute leur longueur. 3° L'œil doit toujours occuper la même position; condition remplie le plus souvent sans qu'on ait besoin de s'en préoccuper, vu que les faces du cristal sont très petites. Il peut même arriver que ces faces ne soient pas visibles, quoiqu'on puisse apercevoir facilement l'image réfléchie de la mire. 4° L'axe de rotation du cercle doit être contenu dans le plan qui partage en deux parties égales l'angle dièdre à mesurer. Alors, deux normales aux faces, partant d'un point de cet axe, tourneront autour de leur point d'intersection, et le pied de l'une d'elles pourra être amené à prendre la place du pied de l'autre, de manière que les deux faces occupent successivement la même position. Si, au contraire, l'axe passait à une certaine distance du plan bissecteur, les normales abaissées d'un point de cet axe sur les faces, seraient de longueur inégale, et une face ne pourrait pas prendre la place de l'autre; elle ne pourrait que devenir parallèle à la direction première de celle-ci, et l'écart serait égal à la différence de longueur des deux normales. Si cet écart était sensible par rapport aux distances des mires à l'axe, les surfaces qui réfléchissent successivement l'une des mires, ne seraient pas exactement parallèles quand il y aurait coïncidence avec l'autre mire, et l'angle trouvé ne serait pas exactement celui des deux faces. On évite cette cause d'erreur en choisissant des mires assez éloignées pour que l'angle sous-tendu par la différence des deux normales et ayant son sommet à l'une ou l'autre mire, soit plus petit que la fraction de degré que permet d'évaluer le vernier. — Comme il est impossible, avec un cristal très petit, de connaître la position du plan bissecteur, on cherche à faire passer par l'axe du cercle, l'arête même de l'angle.

Goniomètre de Mitscherlich. — Le goniomètre de M. Mitscherlich n'est autre que celui de Wollaston, auquel sont ajoutées différentes pièces accessoires, destinées à en rendre l'usage plus sûr et plus facile. Une pince, à vis de pression agissant sur le contour du cercle, sert à le rendre fixe pendant qu'on fait tourner le cristal. Une vis de rappel, portée par le pied de l'instrument, sert à mouvoir la pince, et par conséquent le cercle, de manière à placer celui-ci, avec précision, dans la position demandée. A l'axe intérieur qui porte le système *cno* (*fig.* 1125), est adapté, entre les têtes *b* et *t*, un bras traversé par une vis de rappel prenant son point d'appui dans une pince que l'on arrête sur la tête *t*. Au moyen de cette vis, on achève de donner au cristal exactement la position pour laquelle les deux mires coïncident. Le support du

cristal est muni de plusieurs vis destinées à l'orienter avec précision. Les unes servent à le déplacer parallèlement et perpendiculairement au plan du cercle, d'autres lui impriment des mouvements obliques pour placer son arête perpendiculairement au limbe. Enfin, une petite lunette, articulée à l'extrémité d'une colonne fixée au pied de l'instrument, sert à viser le cristal. Un fil horizontal, tendu au foyer de cette lunette, permet de n'employer qu'une seule mire, dont on fait coïncider l'image réfléchie par le cristal, avec ce fil.

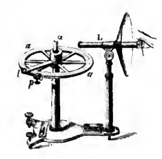


Fig. 1426.

Quand les faces du cristal sont ternes ou très petites, la lunette affaiblissant les rayons réfléchis, on doit l'enlever et regarder directement en se servant du miroir. Il est même des cas où il faut opérer dans une chambre obscure, en prenant pour mire une fente d'un écran, derrière laquelle on place une bougie.

M. Ch. Chevallier a aussi apporté au goniomètre de Wollaston différentes modifications qui le rendent plus précis. M. Mosch a disposé horizontalement le cercle gradué, à cause de la facilité de trouver des mires verticales éloignées, par exemple, les angles des édifices, les jambages des portes et des fenêtres. Alors l'arête du cristal doit évidemment être verticale.

1914. Goniomètre de Charles et Malus. — Ce goniomètre est horizontal et n'exige qu'une seule mire. Le cristal (*fig.* 1426) est fixé verticalement avec de la cire, au-dessus de l'axe d'une alidade *l* tournant autour de l'axe du cercle gradué *aa*, et portant un vernier avec pince à vis de rappel *p*. Une lunette à réticule sert à viser, par réflexion sur une des faces du cristal, une mire éloignée. On fait de même avec l'autre face, en faisant tourner convenablement l'alidade, et le déplacement angulaire qu'elle a subi représente le supplément de l'angle cherché.

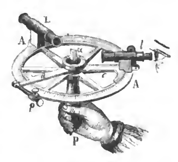


Fig. 1427.

1915. Goniomètre de M. Babinet. — Avec cet instrument, on n'a plus besoin de mire éloignée. Un cercle gradué AA est fixé par son centre à une poignée P, ou à un pied à genou. Un *collimateur* L, ou tube à réticule dont un des fils est perpendiculaire au plan du cercle, est fixé parallèlement à un rayon de ce cercle. Quand il est tourné vers le jour, les fils enveloppés par un faisceau de rayons parallèles, forment des ombres qui remplacent une mire placée à l'infini. Une lunette à réticule *l*, dirigée comme le collimateur, est fixée sur un bras *c* tournant autour du centre, et muni d'un vernier et d'une pince avec vis de rappel. Le cristal α est collé avec de la cire molle, perpendiculaire-

ment au cercle, sur un support placé au centre de l'appareil, et que l'on peut faire tourner sur lui-même au moyen d'une alidade *a* à vernier et pince à vis de rappel *p*. On place d'abord la lunette *l* de manière qu'elle fasse un certain angle avec le collimateur L ; puis, ayant placé le vernier de l'alidade *a* sur le zéro du cercle, on fait tourner le cristal avec son support, jusqu'à ce que, en regardant à travers la lunette *l*, on voie le centre de son réticule coïncider avec celui du collimateur, vu par réflexion sur l'une des faces du cristal. On fait ensuite tourner le cristal au moyen de l'alidade *a* jusqu'à ce que la même coïncidence se reproduise par réflexion sur l'autre face; et l'angle indiqué par le vernier de l'alidade est le supplément de l'angle cherché. — Comme la lumière extérieure, en se réfléchissant sur la face du cristal, peut empêcher de distinguer nettement l'image du collimateur, on entoure ce cristal d'écrans noirs, qui interceptent toute autre lumière que celle qui sort du collimateur. Du reste, l'emploi d'une lunette fait que ce goniomètre ne peut être employé pour les cristaux ternes ou trop petits.

Il faut toujours que l'arête du cristal soit bien perpendiculaire au plan du cercle, et passe par son centre. Pour réaliser la première condition, on commence par disposer les réticules de la lunette et du collimateur de manière qu'un de leurs fils soit perpendiculaire au plan du cercle, et cela en plaçant un second fil, qui est perpendiculaire au premier, parallèlement à ce plan. Cela se fait avant de placer le cristal : on améne la lunette *l* sur le prolongement du collimateur L, et l'on fait tourner sur elles-mêmes les viroles qui portent les fils, de manière à placer, le plus exactement possible, un de ces fils parallèlement au plan du cercle; alors deux fils des tubes L et *l* sont paralléles entre eux. On déplace ensuite la lunette *l* à droite et à gauche, et l'on observe si ces deux fils conservent la même distance pendant les mouvements. S'il en est ainsi, c'est qu'ils sont exactement parallèles au cercle. On fixe ensuite le cristal avec de la cire, on place la lunette *l* de manière à voir par réflexion dans l'une des faces l'image des fils du collimateur, et l'on cherche à placer le cristal de manière que l'image du fil perpendiculaire au limbe soit encore parallèle au fil de la lunette. Quand cela a lieu avec les deux faces du cristal, l'arête est perpendiculaire au limbe. On tourne ensuite un des réticules, de 45°, pour distinguer plus facilement quand il y a coïncidence des points de croisement, et l'on procède à la mesure de l'angle.

1916. Mesure de l'angle d'un prisme. — Quand l'angle est formé par des surfaces polies d'assez grande étendue, comme dans le cas d'un prisme de verre, on emploie pour le mesurer, la lunette mobile sur un cercle gradué qui sert à démontrer les lois de la réflexion (1894). Soit A (*fig.* 1428) l'angle que l'on veut mesurer. On fixe d'abord le prisme, ABC, de manière que ses arêtes soient perpendiculaires au plan du cercle; puis, ce cercle étant en *o*, on vise une mire éloignée, d'abord par réflexion sur la face AB, puis directement, et l'on mesure l'angle $soi = d$. La mire doit être assez éloignée pour que les rayons *so* et *s'i*, qui en émanent, puissent être regardés comme parallèles. Transportant

ensuite le cercle gradué en o', on vise la même mire par réflexion sur la face AC, puis directement, et l'on mesure l'angle $s_1o'i' = d'$. L'angle cherché sera égal à $\frac{1}{2}(d+d')$. En effet, menons la ligne AD, parallèle à la direction commune des rayons incidents. L'angle A sera partagé en deux parties α et β, qu'il suffit d'évaluer. Or, on a $\alpha = S'iA = oiB$, et par conséquent, $2\alpha = 180° - s'io$. Mais on a aussi $soi = d = 180° - s'io$; donc l'angle d est égal à 2α. De même, d' est égal à 2β; on a donc $\alpha + \beta = \frac{1}{2}(d + d')$.

Arago et Petit ont employé une autre méthode tout aussi exacte. Le cercle gradué étant en o (*fig.* 1429), on vise une mire s' directement, puis par réflexion sur la face AB, et l'on mesure l'angle $s'oi = d$. On vise de même une seconde mire r, directement, et par réflexion sur la seconde face AC, et l'on mesure l'angle $i'o'r' = d'$. Enfin,

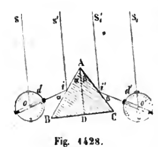


Fig. 1428.

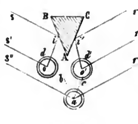


Fig. 1429.

on mesure l'angle $s''ar'' = D$, obtenu en visant successivement aux deux mires. Pour déduire l'angle A du prisme, des valeurs de D, d et d', menons ab et ac parallèles à AB et AC; on aura $bas'' = Bis = \frac{1}{2}d$; $car'' = Ci'r = \frac{1}{2}d'$, et $bac = A = D - bas'' - car'' = D - \frac{1}{2}(d + d')$.

III. Héliostats.

1917. Porte-lumière. — Dans les expériences d'optique, on a souvent besoin de faire entrer dans la chambre obscure, un faisceau de rayons solaires conservant une direction donnée, malgré le mouvement du soleil. Pour atteindre ce but, on emploie les *héliostats*. Mais comme ces instruments sont longs à installer, quand on n'a pas besoin d'une grande exactitude, on se sert du *porte-lumière* à réflexion, que nous allons d'abord décrire. Cet appareil (*fig.* 1430) consiste en un miroir MM' placé en dehors du volet de la chambre obscure, et pouvant recevoir deux mouvements, l'un autour d'un axe perpendiculaire au volet, l'autre autour d'un axe parallèle. t, t' sont deux montants qui soutiennent l'axe parallèle, oo'; ils sont fixés à un plateau circulaire denté, renfermé dans une double plaque PP' que l'on adapte, au moyen de vis, à l'ouverture du volet. On peut faire tourner ce plateau sur lui-même, au moyen d'un pignon denté dont la tête A est en dedans de la chambre. Le mouvement autour de oo' est

imprimé au miroir par une petite roue dentée o', et une vis sans fin v que l'on fait aussi tourner de l'intérieur, au moyen du bouton V. La tige de la vis est portée par le plateau denté, et se meut avec lui en passant par une fente circulaire cc'. En agissant sur les deux boutons A et V, on donne au miroir une position telle que les rayons réfléchis entrent suivant une direction donnée, par l'ouverture ménagée au centre de la plaque; et il suffit d'agir de temps en temps sur les deux boutons A et V, pour ramener les rayons réfléchis dans cette direction, quand ils la quittent par l'effet du mouvement du soleil.

Pour rendre cette manœuvre plus commode, M. Dubosq a réuni les deux boutons, comme on le voit en *ab*, en faisant passer la tige de la vis sans fin dans l'axe du pignon denté. Ce dernier se déplace alors avec le plateau circulaire qui porte le miroir, et lui imprime son mouvement en engrenant dans une couronne fixe c, dont les dents sont dirigées vers le centre.

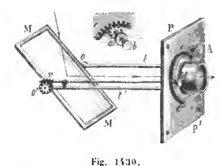


Fig. 1430.

1918. HÉLIOSTATS. — Les *héliostats* sont des appareils destinés à donner par réflexion une direction constante, aux rayons du soleil, malgré son mouvement horaire. Indépendamment de son déplacement apparent d'orient en occident, le soleil en possède un autre en vertu duquel il s'approche ou s'éloigne de l'équateur en coupant successivement les divers parallèles compris entre les tropiques; de sorte que, par la combinaison de ces deux mouvements, il paraît décrire une courbe hélicoïdale. Le mouvement dans le sens du méridien est négligeable pendant la durée du jour; nous n'aurons donc à tenir compte que du mouvement apparent d'orient en occident. Nous supposerons aussi que la terre est réduite à un point, c'est-à-dire que nous négligerons son rayon; l'angle sous-tendu par ce rayon, ayant son centre sur le soleil, n'étant que de 16 secondes.

Héliostat de Fareinheit. — Cet instrument, le plus simple de tous, donne un rayon réfléchi constamment parallèle à l'axe de la terre. Il consiste en une horloge HH' (*fig.* 1431), dont l'aiguille parcourt le cadran *en 24 heures*. On dirige ce cadran parallèlement à l'équateur. Pour cela, on commence par donner à un axe horizontal *oo*, autour duquel l'horloge peut basculer, une direction perpendiculaire au méridien du lieu, puis on incline l'horloge de manière que le plan HH' fasse avec la verticale un angle égal à la latitude du lieu, angle qui se mesure sur l'arc divisé *c* fixé à l'axe *oo* et tournant avec lui. L'axe de l'aiguille de l'horloge se trouve alors parallèle à l'axe du monde, et un rayon solaire *sn* décrit autour de cet axe un cône dont le demi-angle au sommet *snr* est le complément de l'angle *snd* que fait un rayon solaire avec l'équateur, angle

qui n'est autre chose que la *déclinaison* du soleil. Si donc nous adaptons à l'axe *na*, un miroir plan perpendiculaire au plan *snr* du méridien, lequel se confond avec le plan *nal* dans lequel se trouve l'aiguille indiquant l'heure vraie, et si ce miroir est perpendiculaire à la bissectrice *nn'* de l'angle *snr*, le rayon *sn* se réfléchira suivant *nr* parallèle à l'axe de la terre. De plus, comme le miroir tourne avec l'aiguille *al*, de manière que le plan *nal* coïncide toujours avec le plan du méridien qui contient le soleil, on voit que le rayon réfléchi sera toujours dirigé suivant *nr*. — Si l'on veut donner à ce rayon une toute autre direction, il suffira de le faire réfléchir par un second miroir fixé dans une direction convenable. Mais la double réflexion faisant perdre beaucoup de lumière, on a cherché à obtenir le résultat, au moyen d'une seule réflexion.

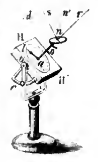
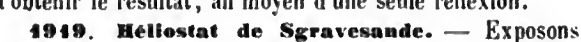


Fig. 1431.


1919. Héliostat de Sgravesande. — Exposons d'abord le principe de cet instrument. Soit *ss'* (*fig.* 1432) le cercle, parallèle à l'équateur, que parcourt le soleil le jour de l'expérience, PP' l'axe du monde, *o* le point où est installé l'instrument, point que nous regardons comme se confondant avec le centre de la terre; *or* la direction constante que l'on veut donner au rayon réfléchi. Supposons le soleil en *s*; *so* sera le rayon incident, et l'angle *so*E que fait ce rayon avec un plan parallèle à l'équateur, sera la déclinaison du soleil. Prenons sur les prolongements du rayon incident *so* et du rayon réfléchi *or*, des longueurs égales *oi* et *or'*; le triangle *or'i* sera isocèle, et la normale *om* au miroir, divisant l'angle *r'oi* en deux parties égales, passera par le milieu *m* de la base *r'i*. Lorsque le soleil marche sur la circonférence *ss'*, le point *i* décrit une circonférence *ii'* parallèle à l'équateur, et la droite *r'i*, un cône oblique ayant pour base cette circonférence, et pour sommet *r'*. Les milieux des arêtes de ce cône, par lesquels passe toujours la normale au miroir, décrivent une circonférence *mm'* parallèle à *ii'* et d'un rayon moitié moindre. Il suffira donc, pour qu'un miroir placé en *o* réfléchisse constamment les rayons solaires dans la direction donnée *or*, qu'il porte une tige ou *queue om* perpendiculaire à sa surface, et que cette tige s'appuie constamment sur la circonférence *mm'*, ou décrive le cône *omm'*. Pour cela, on placera en *mm'* un cadran d'horloge parallèle à l'équateur, dont l'aiguille, faisant un tour en 24 heures, entraînera la queue du miroir, en restant toujours dans le méridien occupé par le soleil.

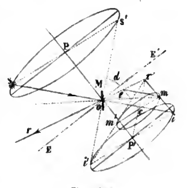


Fig. 1432.

On voit que l'ombre d'un style *ec* perpendiculaire au centre du cadran *mm'*, devra toujours tomber sur l'aiguille *cm* quand elle donnera l'heure vraie. De plus, si la longueur de ce style est limitée en *e*, par le prolongement *or'* du rayon réfléchi, l'extrémité de l'ombre tombera au point où la normale *om* rencontre l'aiguille *cm*. Les valeurs de *oe* et de *ce*, qui correspondent à cette condition, peuvent se calculer en fonction de la longueur $cm = l$ et de la déclinaison *d* du soleil. En effet, le triangle rectangle *ecm* donne

$$\overline{ce} = \overline{cm} \text{ tang } \overline{emc} = l \text{ tang } d; \qquad [1]$$

car, *em* étant parallèle à *oi*, l'angle *emc* est égal à *soe* qui est la déclinaison. On a de plus $\overline{oe} = \frac{1}{2}\overline{or'} = \frac{1}{2}\overline{oi} = \overline{em}$, puisqu'on a fait $or' = oi$. Or, le triangle *emc* donne

$$cm = l = \overline{em} \cos \overline{emc} = \overline{em} \cos d; \qquad \text{d'où} \qquad em = oe \frac{l}{\cos d}. \qquad [2]$$

Description de l'appareil. — HH' (*fig.* 1433) est l'horloge, dont on dirige le cadran parallèlement à l'équateur, cette horloge pouvant tourner autour d'un axe horizontal parallèle à son cadran. L'aiguille *cm*, qui accomplit un tour en 24 heures, dépasse le cadran et porte une fourchette *f* pouvant tourner sur elle-même, et dont les branches soutiennent un axe perpendiculaire à un petit tube en métal dans lequel glisse la queue *of* du miroir *o*. Ce miroir peut tourner en tout sens à l'extrémité de son support, de manière que la queue *of* puisse suivre les mouvements de l'aiguille. On place celle-ci sur l'ombre du style, et si l'on donne à ce dernier une longueur telle que l'extrémité de son ombre tombe en *f*, la longueur du style et la distance *cf* seront liées par la formule [1].

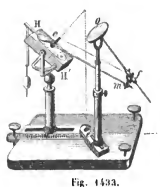


Fig. 1433.

La direction du rayon réfléchi dépend de la position du centre du miroir. Dans l'appareil de Sgravesande, ce miroir étant porté par un pied indépendant de celui de l'horloge, il était assez difficile de lui donner exactement la position convenable. Charles a apporté à l'appareil un perfectionnement important; le pied de l'horloge peut glisser dans une rainure dirigée suivant la méridienne, et le pied du miroir est engagé dans une rainure d'une règle pouvant tourner autour d'un axe *e* placé sur la verticale qui passerait par l'extrémité du style, s'il avait la longueur donnée par la formule [1]. Des divisions permettent d'évaluer les distances des axes du support de l'horloge et du miroir, au pivot *e*. Enfin, le miroir peut s'élever et s'abaisser à volonté.

Installation de l'appareil. — Il nous reste à dire comment on installe

l'instrument, pour obtenir un rayon réfléchi dans une direction donnée. Supposons d'abord que cette direction or (*fig.* 1434) soit dans le plan du méridien oPc', et soit α l'angle oep qu'elle fait avec l'horizon. Il faudra placer le centre du miroir de manière que la ligne oe ait la direction demandée, et pour cela donner aux distances $e'c'$, Pe' et oP, des valeurs que nous allons calculer. La valeur de $e'c'$ est indépendante de α, mais elle dépend de la déclinaison d le jour de l'expérience; elle est donnée par le triangle rectangle enc, dans lequel on a $nc = e'c' = ec \cos \lambda$, en appelant λ l'angle ecn, qui n'est autre chose que l'angle de la latitude du lieu, ec étant parallèle à l'axe du monde. Or, la formule [1] nous a donné $ec = l$ tang d; substituant, il vient

$$e'c' = l \text{ tang } d \cos \lambda. \qquad [3]$$

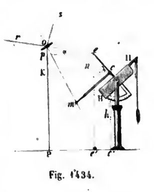


Fig. 1434.

Pour obtenir Pe' ou pe, considérons le triangle rectangle poe; il donne $\overline{pe} = \overline{oe} \cos \alpha$. Remplaçant oe par sa valeur tirée de la formule [2], il vient

$$pe = Pe' = \frac{l}{\cos d} \cos \alpha. \qquad [4]$$

Enfin, pour calculer oP, il suffit de trouver ok; car, la hauteur $kP = cc' = h$ est constante pour une même latitude, et mesurée une fois pour toutes. Or, on a $ok = op + pk = op + en$; et les triangles poe et ecn, donnent $\overline{op} = \overline{oe} \sin \alpha = \frac{l}{\cos d} \sin \alpha$; et $\overline{en} = \overline{pk} = \overline{ec} \cos \lambda = l$ tang $d \cos \lambda$; substituant, il vient

$$oP = h + \frac{l}{\cos d} \sin \alpha + l \text{ tang } d \cos l. \qquad [5]$$

Pour installer l'instrument, il faudra donc placer le cadran de l'horloge parallèlement à l'équateur, faire glisser son pied jusqu'à ce que la distance $e'c'$ ait la valeur donnée par la formule [3], puis faire glisser le pied P du miroir et l'élever, de manière que les distances Pe' et oP aient les valeurs fournies par les deux suivantes. Le zéro des échelles qui mesurent les distances Pe', $e'c'$, sont au point e', où se trouve l'articulation.

Si la direction du rayon réfléchi n'est pas comprise dans le méridien, le plan vertical qui la contient fera avec ce méridien un angle donné β; et comme la distance $c'e'$ est indépendante de α, il suffira de faire tourner le plan oPe', d'une quantité égale à β, autour de l'axe vertical ee'.

On voit que l'installation de l'héliostat de Sgravesande, même perfectionné par Charles, est une opération délicate et qui demande d'assez longs calculs. Aussi

ne se servait-on que rarement de cet instrument. Les appareils que nous allons décrire n'exigent aucun calcul, et sont d'un usage bien plus facile.

1920. Héliostat de Gambey. — Le principe de cet instrument est des plus simples. Considérons un cercle EE' (*fig.* 1435) parallèle à l'équateur, et tournant sur lui-même en 24 heures. Au centre de ce cercle est une colonne *o'o*, qui ne tourne pas avec lui, et à l'extrémité de laquelle est articulée une tige *o*M que l'on place dans la direction *o*MR que doit avoir le rayon réfléchi. A l'extrémité de cette tige est articulé le miroir M, pouvant se mouvoir dans tous les sens. Un levier *cc'f*, mobile autour d'un axe *cc'* parallèle au plan du cercle EE' et passant par le point d'articulation *o*, est dirigé parallèlement aux rayons solaires, et par conséquent fait avec le plan EE' un angle égal à la *déclinaison*. Ce levier est articulé en *f*, par une charnière à double mouvement, avec un tube dans lequel peut glisser une queue M*f* fixée au miroir dans le prolongement de son plan. La distance *of* est exactement égale à *o*M ; de sorte que le triangle *f*M*o* est isocèle, et l'angle M*fo* égal à *f*M*o*, et par conséquent à RM*m*. Si nous menons le rayon incident SM parallèle à *fo*, l'angle SM*f* étant aussi égal à M*fo*, la ligne MR, prolongement de M*o*, sera le rayon réfléchi. Quand maintenant le cercle équatorial EE' tournera sur lui-même, de manière que le plan du triangle *f*M*o* contienne toujours le centre du soleil, la queue M*f* décrira un cône oblique dont la base sera un cercle *fr* parallèle à l'équateur, et le triangle *f*M*o* restant toujours isocèle, tout en changeant de forme, le rayon réfléchi sera constamment dirigé suivant *o*MR.

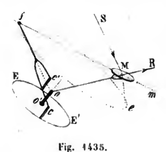


Fig. 1435.

Description de l'appareil. — EE' (*fig.* 1436) est le *cercle équatorial*, sur le contour duquel sont marquées les 24 heures. Il fait un tour en 24 heures sous l'action d'une horloge, renfermée dans le cylindre H, et faisant tourner un pignon denté *p* qui engrène des dents que porte en dessous le cercle EE'. Un index fixe *e* sert à marquer les heures. Le cercle EE', et l'horloge qui le mène, sont fixés à un axe horizontal *oo* porté par une large fourchette FF qui surmonte le pied de l'appareil. Au moyen de cet axe, on peut placer le cercle EE' parallèlement à l'équateur. Pour cela, on dirige l'alidade *aa* qui est perpendiculaire à l'axe *oo*, dans le plan du méridien, puis on incline le plan EE' de manière que l'arc A*v* pris sur le secteur AA' fixé à l'axe *oo*, soit égal au complément de la latitude. Le zéro du vernier fixe *v* est sur la verticale qui passe par l'axe *o*. L'appareil est alors orienté. Au centre du cercle équatorial EE', se trouve la colonne perpendiculaire qui peut tourner sur elle-même et être arrêtée, au moyen d'une vis de pression placée en dessous. Sur cette colonne, est articulée la tige à fourchette T, qui porte le miroir M. Cette colonne peut prendre différentes positions autour d'un axe parallèle

à EE′, et être arrêtée au moyen d'une vis *r* qui presse un petit arc fixé à l'axe. La tige T pourra donc être placée facilement dans la direction que l'on voudra donner au rayon réfléchi, au moyen de ce dernier mouvement et de celui de la colonne sur elle-même. Le levier *cc′f*, mobile autour de l'axe *cc′* qui coupe l'axe d'articulation de la tige T, est soutenu par des supports *c*, *c′* fixés au cercle EE′. L'arc de déclinaison *d* permet de placer le plan *cc′f* de manière qu'il fasse avec l'équateur un angle égal à la déclinaison du jour. Cela fait, il reste à mettre le cercle EE′ sur l'heure vraie. P est un contrepoids destiné à équilibrer tout

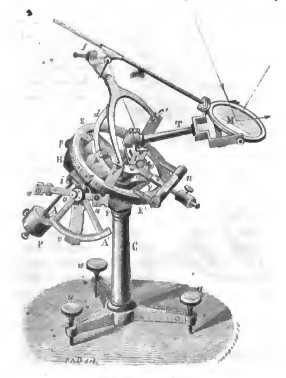


Fig. 1436. — 1/6.

l'appareil, et *n* un autre contrepoids pour équilibrer le cercle EE′ d'après son inclinaison. E′*n* est un niveau à bulle d'air, au moyen duquel on place les trois pieds de l'instrument dans un plan horizontal, en mettant d'abord le cercle EE′ perpendiculaire à la colonne C, c'est-à-dire en faisant coïncider les zéros du vernier *v* et de l'arc AA′, puis agissant sur les vis calantes *u*, *u*, *u*, de manière que la bulle du niveau se tienne toujours au milieu, pendant qu'on fait tourner le cercle EE′ sur lui-même. Le pignon *p*, doit être alors séparé des dents du cercle EE′, ce qui se fait en abaissant un peu l'horloge H, qui peut

basculer sur deux pointes à vis, dont une se voit en *i*. Une vis de pression sert à fixer l'horloge pendant que l'appareil fonctionne.

1921. Héliostat de M. Silbermann. — Cet instrument (*fig.* 1437) est plus simple, et beaucoup moins coûteux que le précédent; mais la théorie en est un peu plus compliquée. HH est une horloge cylindrique, dont on dirige la base parallélement à l'équateur, au moyen de l'arc de latitude *aa* et d'une ligne de foi tracée sur le plateau AB et que l'on dirige dans le méridien du lieu. Pour cela, le plateau AB peut tourner autour d'un axe vertical, et se fixe au moyen de la pince à vis B. L'horloge fait tourner un arbre dirigé suivant son axe et représenté à part en OO. Cet arbre est terminé par une pièce carrée K et *k*, qui tourne sur elle-même en 24 heures, et marque les heures, au moyen d'une aiguille, sur un cadran *cc*, C. Ce cadran est porté par un tube *f* enveloppant l'arbre OO, et fixé au couvercle de l'horloge. Dans une mortaise pratiquée dans la pièce carrée, peut glisser l'arc de déclinaison *dd'*, que l'on peut arrêter dans une position déterminée, au moyen d'une vis de pression représentée à part en D. Le plan de cet arc doit toujours contenir le centre du soleil; ce que l'on obtient en mettant l'aiguille de la pièce carrée *k* sur l'heure vraie. L'arc *dd'* porte une tige normale *d'*, pouvant tourner sur elle-même, et terminée par une fourchette qui s'articule en *oo'* au miroir MM. On donne à cette tige une direction *d'is* parallèle aux rayons solaires, et pour cela, on fait l'arc *d'k* égal au complément de la déclinaison. La tige *d'* conserve le parallélisme avec les rayons incidents, parce qu'elle est entraînée avec la pièce *k* par le mouvement de l'horloge. Un autre arc *bb* peut glisser dans une mortaise, représentée à part en P, pratiquée dans l'épaisseur d'un manchon *t* qui enveloppe le tube fixe *f* et l'axe OO. Ce manchon peut tourner autour du tube *f*, et être arrêté au moyen d'une pince à vis V et *v*. L'arc *bb* porte aussi une tige normale *b* pouvant tourner sur elle-même, et munie d'une fourchette articulée, en *o o,'* au miroir. On donne à cette tige la direction *ir* que doivent avoir les rayons réfléchis, en profitant de la mobilité de l'arc *bb* dans sa mortaise, et de celle du manchon *t*,

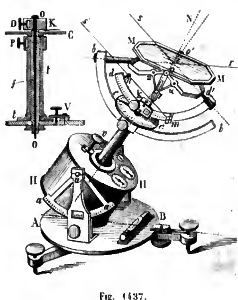


Fig. 1437.

sur lui-même. Cela posé, si l'on mène la droite iN normale au miroir, il faut, pour que le rayon réfléchi soit toujours dirigé suivant bir, que cette normale divise constamment en deux parties égales l'angle sir, ou l'angle des deux tiges b et d', pendant le mouvement de l'horloge. Pour cela, les branches des fourchettes que portent ces tiges sont articulées aux extrémités d'un même axe oo' situé dans le plan du miroir. Deux leviers *égaux* $\gamma\alpha$, $\gamma\beta$ sont articulés en γ, et en deux points α et β, placés à égale distance du point o. En γ est un mentonnet qui glisse dans une coulisse que porte une piéce $o\gamma$ fixée normalement au plan du miroir. Les leviers $\gamma\alpha$, $\gamma\beta$ forcent cette pièce à diviser toujours l'angle $\beta o\alpha$ des plans des deux fourchettes, et par conséquent, l'angle sir, en deux parties égales. Donc, pendant que la piéce carrée k tournera avec l'horloge, de maniére que la tige d' reste toujours parallèle aux rayons, si, du soleil, les fourchettes tourneront sur les tiges b, d' qui les supportent, les articulations o, α, γ, β se prêteront à ces mouvements, et la tige b restant fixe, avec le manchon qui porte l'arc bb, le rayon réfléchi dirigé suivant le prolongement de cette tige, ne changera pas de position.

Au lieu de disposer l'arc dd' d'aprés la déclinaison du soleil, on peut se servir de la mire n et du petit écran m, placés de manière que mn soit parallèle à la tige d'; on fait en sorte que les rayons solaires passant par la miro n, tombent exactement au milieu de l'écran m. On peut, au moyen de ce système de mire, installer l'instrument en ne connaissant que deux des trois quantités nécessaires, savoir : la latitude, la déclinaison et l'heure vraie.

L'héliostat de M. Silbermann est des plus ingénieux, mais il présente un inconvénient qu'on ne peut éviter qu'à force de précision dans l'ajustement des pièces qui soutiennent le miroir ; c'est que le système articulé $o\alpha\beta\gamma$ jouant avec une extrême lenteur, parce que sa position ne permet de lui donner que de petites dimensions, le moindre jeu dans les articulations suffit pour que le miroir éprouve de temps en temps des mouvements brusques, qui se transmettent avec une amplitude double, au rayon réfléchi (1904). On a remédié, en partie, à cet inconvénient, en plaçant le système $o\alpha\gamma\beta$ au-dessus du miroir, ce qui permet de lui donner de plus grandes dimensions.

Nous terminerons par une remarque qui s'applique à tous les héliostats que nous venons de décrire. La chaleur du soleil à laquelle est exposée l'horloge, altère sensiblement la régularité de ses mouvements. Il faut donc la préserver des rayons solaires par un écran. Rien n'empêche, du reste, d'imprimer le mouvement aux piéces mobiles des appareils, au moyen d'une horloge placée dans la chambre obscure, et qui communiquerait avec ces piéces par un arbre tournant traversant le volet. Mais l'appareil serait plus compliqué et plus long à installer. S'il devait rester à poste fixe dans un lieu déterminé, la difficulté disparaîtrait; on pourrait, en outre, lui donner alors de plus grandes dimensions, et plus de force à l'horloge, ce qui permettrait d'obtenir de meilleurs résultats.

§ 3. — RÉFLEXION SUR LES SURFACES COURBES, ET INSTRUMENTS D'OPTIQUE QUI S'Y RAPPORTENT.

I. Disposition des rayons réfléchis par les miroirs courbes.

1922. Caustiques par réflexion. — Quand des rayons partant d'un point lumineux *s* (*fig.* 1438) se réfléchissent sur une surface courbe *mm*, on peut toujours tracer sur cette surface un premier système de courbes, dites *lignes de réflexion*, telles que les rayons infiniment voisins réfléchis sur une de ces courbes, A*a*, C*c*, E*e*, N*n*...., se rencontrent deux à deux, eux ou leur prolongement. Ces rayons forment ainsi une *surface développable* [1], composée des petits éléments triangulaires infiniment étroits AC*a*, CE*c*, EN*e*..... , et la courbe *acen*..... , formée par les intersections des rayons réfléchis deux à deux , est l'*arête de rebroussement* de cette surface. Toutes les courbes du système donnant ainsi une surface développable et une arête de rebroussement , l'ensemble de toutes les arêtes forme une surface, en chaque point de laquelle il se croise au moins deux rayons réfléchis ; on la nomme *surface caustique par réflexion*, ou *catacaustique*. Quand ce sont les rayons mêmes qui se croisent. et non leur prolongement, la caustique est dite *réelle* , et chacun de ses points reçoit plus de lumière que l'espace environnant.

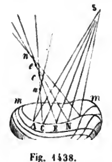


Fig. 1438.

Ces résultats se démontrent par l'analyse mathématique. On démontre aussi qu'il existe un second système de *lignes de réflexion* qui coupent perpendiculairement celles du premier système, et qui jouissent des mêmes propriétés. De sorte que les rayons réfléchis forment deux *caustiques*.

Lignes focales. Foyers. — Les intersections des deux surfaces caustiques se nomment *lignes focales* ou *foyers*, suivant que ces intersections sont des lignes ou des points. On voit qu'en chaque point d'une ligne focale il passe au moins 4 rayons réfléchis.

1923. Cas des miroirs sphériques. — Appliquons les principes qui précèdent au cas d'un miroir sphérique *m*A*m'* (*fig.* 1439), dont le centre est en *o*. Le diamètre AR passant par le point lumineux *s*, se nomme l'axe du miroir correspondant au point *s*. Dans ce cas, le premier système de courbes est formé par les circonférences perpendiculaires à l'axe *s*A. Les rayons réfléchis sur une de ces circonférences, *pp'*, vont tous évidemment se rencontrer en un même

[1] Une surface est développable quand elle peut s'étendre dans un plan sans se déchirer et sans faire de plis.

point n de l'axe, puisque tout est symétrique autour de cet axe. La surface développable qu'ils forment est alors un cône, dont l'arête de rebroussement, réduite à un point, est le sommet n ; et la surface caustique formée par l'ensemble des arêtes de rebroussement de tous les cônes, se réduit ici à une ligne droite, qui est une portion de l'axe A*s*.

Le second système de courbes est formé par les grands cercles passant par l'axe. Les rayons réfléchis sur un de ces cercles étant tous dans le plan même de ce cercle, la surface développable qu'ils forment est un plan, et leurs intersections deux à deux, forment une courbe plane *acef*, qui représente l'arête de rebroussement. Pour obtenir la surface caustique correspondante à ce second système de courbes, il suffira de faire tourner la courbe *acef* autour de l'axe, et l'on obtiendra la surface caustique, qui présente, près de l'axe, la forme d'un pavillon de cor.

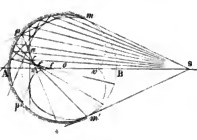


Fig. 1439.

Enfin, le point f où cette surface caustique rencontre celle de l'autre système de courbes, c'est-à-dire l'axe, sera un foyer.

1924. Cas des miroirs de révolution. — Ce qui précède s'applique à une surface de révolution quelconque, *dont l'axe de révolution passerait par le point lumineux* ; les deux systèmes de courbes sont alors formés par les parallèles et par les méridiennes. La surface caustique du second système affecte une forme qui dépend de celle de la méridienne.

Les surfaces caustiques ont été trouvées par Tschirnhausen, en 1682. Barrow avait été bien près de les découvrir, car il considère le concours des rayons réfléchis ; mais il n'eut pas l'idée d'examiner la courbe qu'ils pouvaient former en se coupant deux à deux. On peut montrer les surfaces caustiques, au moyen d'un grand miroir sphérique exposé au soleil, en plaçant un écran suivant l'axe de la caustique ; l'intersection de cette surface avec l'écran se distingue par un éclat plus vif. On peut encore employer un miroir cylindrique (*fig.* 1440) posé sur un plan et recevant, du côté concave, la lumière d'une bougie : on voit la surface caustique se dessiner sur le plan, par un plus grand éclat que partout ailleurs. On peut faire cette expérience avec une simple feuille de fer-blanc, ou se servir de l'intérieur d'un vase cylindrique verni.

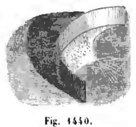


Fig. 1440.

1925. Construction de la génératrice de la caustique plane d'un miroir sphérique. — Petit a donné une méthode pour construire cette

génératrice par points, en cherchant les distances de ces points aux points d'incidence. Soit S (*fig.* 1441) le point lumineux, et o le centre du miroir sphérique mm, que nous supposons concave, pour fixer les idées. Considérons un rayon incident Si, dont la position est déterminée par la distance $p = Si$ et par la corde bi, que nous représenterons par $4a$. Le rayon réfléchi ir se construit facilement en menant la normale in, et prenant l'arc nr égal à nb.

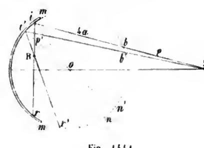


Fig. 1441.

Soit Si' un second rayon incident infiniment voisin du premier. Le point R, où le rayon réfléchi $i'r'$ coupe le rayon réfléchi ir, est un point de la courbe cherchée; et il s'agit de trouver la distance Ri en fonction de p et de a. Pour cela, nous allons calculer les changements qu'éprouvent l'angle d'incidence et l'angle de réflexion quand le rayon vient de Si en Si', et écrire que ces changements sont égaux. Or, les angles d'incidence Sin, $Si'n'$ ont pour mesure $\frac{1}{2}nb$ et $\frac{1}{2}n'b'$. Leur différence a donc pour mesure $\frac{1}{2}(nb-n'b')=\frac{1}{2}(bb'+nn')$. De même, la différence entre les angles de réflexion est égale à $\frac{1}{2}(nr-n'r')=\frac{1}{2}(rr'-nn')$. Egalant les deux différences, il vient

$$rr'-nn'=bb'+nn', \quad \text{ou} \quad rr'-bb'=2ii', \qquad [1]$$

en remarquant que ii' est égal à nn'. Il reste à évaluer rr' et bb' en fonction de p et de a. L'angle iSi' étant infiniment petit, les triangles Sbb', Sii' sont semblables, et l'on a $\overline{bb'} : ii' = \overline{Sb} : Si = (p-4a) : p$. Les triangles iRi', rRr' donnent de même, en désignant par p' la distance cherchée Ri, $\overline{rr'} : \overline{ii'} = \overline{rR} : Ri = (4a-p') : p'$, en remarquant que l'on a $\overline{ir}=\overline{ib}=4a$. Portant dans l'égalité [1], les valeurs de bb' et rr', ii' disparaît et il vient

$$\frac{4a-p'}{p'}-\frac{p-4a}{p}=2, \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a},$$

en réduisant au même dénominateur et divisant tous les termes par $4pp'a$. De cette formule, on tire la valeur de p' ou la distance Ri correspondant à chaque rayon incident ou à chaque valeur de p et de a.

Si le miroir est convexe, le point R se trouve sur le prolongement des rayons réfléchis, et p' et $4a$, étant comptés du côté opposé du miroir par rapport à p, doivent être pris négativement; la formule devient donc

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{a},$$

résultat qu'on peut trouver directement.

1926. Formes de la méridienne de la caustique. — Quand on construit cette méridienne par points, on lui trouve une forme différente, suivant la position du point lumineux.

1° Cas des rayons parallèles. — Si les rayons incidents sont parallèles, il faut poser, dans la formule, $p = \infty$, et l'on en tire alors $p' = a$, ou le quart de la corde interceptée sur le rayon incident. Tschirnbausen et Lahire ont trouvé que, dans ce cas, la génératrice de la caustique est une épicycloïde engendrée par un point d'une circonférence *ami* (*fig.* 1442), ayant un rayon égal au quart de celui du miroir, et roulant sur une circonférence concentrique à ce dernier, et d'un rayon *ao* moitié moindre. Soit AB le diamètre parallèle à la direction des rayons incidents, et *si* un de ces rayons, donnant le rayon réfléchi *im*. Décrivons la circonférence *ami*, ayant son centre sur *oi*. Le rayon réfléchi la coupera au point *m*, et il faut prouver que ce point appartient à la caustique, et en même temps à l'épicycloïde engendrée par le point *c* de la circonférence Ac roulant sur la circonférence *oc*. 1° Pour montrer que le point *m* appartient à la caustique, il faut faire voir que l'on a $im = a = \frac{1}{4} is$. Or, si l'on abaisse sur AB la perpendiculaire $m'p$, elle passe par le point *a*, l'angle droit $im'a$ devant être inscrit dans la demi-circonférence, et nous avons $im' = im$. De plus, les triangles $im'a$, *apo* sont égaux, puisque *ao* est moitié de *oi* ; on a donc

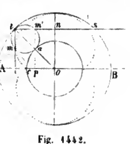


Fig. 1442.

$po = m'n = m'i$, et, par conséquent, $m'i = im = \frac{1}{4} is = a$. 2° Le point *m* appartient à l'épicycloïde décrite par le point *c*, car l'arc *ac* est égal à l'arc *ma*. En effet, l'angle *aoc* a pour mesure l'arc *ac*, et l'angle *mia* qui lui est égal, la moitié de l'arc *am*. Cet arc *am* contient donc deux fois plus de degrés que l'arc *ac* ; mais les degrés de l'arc *ac* sont deux fois plus grands que ceux de *am*, le rayon de *ac* étant double de celui de *am* ; les longueurs absolues des arcs *am* et *ac* sont donc égales.

La partie de la courbe qui se trouve à droite du diamètre *on* est *virtuelle* ; elle provient des rayons réfléchis sur la partie antérieure B de la surface sphérique, considérée comme formant un miroir convexe.

2° Supposons que le point lumineux se rapproche du miroir, tout en restant en dehors de la surface sphérique, et soit *s* sa position (*fig.* 1439). Les deux parties *mafm'* et *mvm'* de la courbe ne sont plus égales comme dans le cas précédent ; elles sont séparées par les points *m* et *m'* où les rayons incidents sont tangents à la circonférence, et la partie virtuelle *mvm'* provient, comme dans les cas des rayons parallèles, des rayons réfléchis sur la surface convexe *mBm'*. De plus, les deux parties sont tangentes à la circonférence en *m* et *m'*. Si le point *s* se rapproche de B, les points de contact *m*, *m'* se rapprochent eux-mêmes de l'axe *s*A ; et quand le point lumineux arrive en B, les points *m* et *m'* se confondent avec lui, la courbe *mvm'* disparaît, et la courbe *mfm'* est tan-

gente en B à l'intérieur de la circonférence. Nous avons alors le cas d'une sphère polie intérieurement, renfermant un point lumineux situé sur sa surface.

3° Si le point lumineux quitte le point B en se rapprochant du centre, *s* (*fig.* 1443), la génératrice présente un sommet *e* sur l'axe, correspondant aux rayons incidents les plus rapprochés de cet axe, un point de rebroussement *r*, puis forme une branche *rt'* qui s'étend à mesure que les rayons incidents s'écartent de l'axe, et va jusqu'à l'infini. Il y a un certain rayon incident *sn'* qui donne un rayon réfléchi asymptote à la branche *rt'*. A partir de ce rayon *sn'*, la génératrice devient virtuelle ; elle présente une branche *av'*, qui, venant de l'infini, rencontre l'axe en *a*, où se trouve un second sommet. Cette branche *av'* a aussi pour asymptote le prolongement du rayon réfléchi *t'n'*. — A mesure que le point lumineux *s* s'approche du point *c*, milieu du rayon B*o* de la

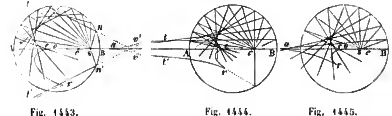


Fig. 1443. Fig. 1444. Fig. 1445.

sphère, les branches *t*, *t'* se rapprochent de l'axe, ainsi que le point *r*, et la partie virtuelle *avv'* s'éloigne de B.

4° Quand le point *s* arrive au milieu *c* du rayon (*fig.* 1444), les branches *t*, *t'* deviennent asymptotes à l'axe BA, de sorte qu'on peut dire que les rayons réfléchis très près de l'extrémité B de l'axe la plus rapprochée du point lumineux, sont parallèles à cet axe. Le sommet *e* de la caustique correspond aux rayons réfléchis près du point opposé A.

5° Si le point lumineux *s* se trouve entre le milieu *c* du rayon et le centre *o* (*fig.* 1445), les branches *t*, *t'* se resserrent et se rencontrent sur l'axe, en formant un second sommet réel *a* correspondant aux rayons réfléchis près du point B, et la courbe méridienne est alors entièrement fermée. Les points de rebroussement, *r*, ainsi que les sommets *e* et *a*, se rapprochent du centre *o* en même temps que *s*, et la courbe se rapetisse et finit par se confondre avec les points *o* et *s*, quand ce dernier arrive au centre. Ce résultat pouvait être prévu, car les rayons incidents étant alors tous normaux à la surface sphérique, les rayons réfléchis se croisent au centre.

Remarquons enfin, en général, que la caustique, réelle ou virtuelle, a toujours au moins un sommet, et que ce sommet est tourné vers le centre, quand il est formé par les rayons réfléchis près de l'extrémité de l'axe située du

même côté que lui par rapport au centre ; comme en e (*fig.* 1443, 1444, 1445), et en f et v (*fig.* 1439).

II. Propriétés des miroirs sphériques à petite ouverture.

1927. Un miroir sphérique est ordinairement limité par un contour circulaire. On nomme *axe principal*, une droite passant par le centre de figure et par le centre de la sphère dont ce miroir fait partie ; et *axe secondaire*, ou simplement *axe*, par rapport à un point lumineux, la droite qui passe par ce point et par le centre de la sphère. Un plan mené par l'axe principal, coupe le miroir suivant un arc de cercle, et le nombre de degrés contenus dans cet arc se nomme l'*ouverture* du miroir.

1928. Propriétés des miroirs à ouverture infiniment petite. — Quand des rayons lumineux, partant d'un point, tombent sur un miroir sphérique infiniment petit par rapport à son rayon de courbure, les rayons réfléchis se croisent en un même point nommé *foyer*, situé sur l'axe du point lumineux. — Pour le démontrer, on peut employer la méthode que nous avons suivie en parlant de la réflexion de la chaleur (II, 720). Mais cette démonstration ne s'applique qu'au cas des miroirs concaves. Celle qui suit convient également aux miroirs convexes.

Fig. 1446.

Soit mn (*fig.* 1446) le miroir, que nous supposons convexe pour fixer les idées, s le point lumineux, et sn un rayon incident donnant un rayon réfléchi, qui, prolongé, vient couper l'axe en f. Comme l'arc An est infiniment petit, nous poserons $sn = s\text{A} = p$, et $fn = f\text{A} = p'$, p est la distance du point lumineux à la surface du miroir, et p' celle du point f à la même surface, et il s'agit de trouver la valeur de p'. On a d'abord, en considérant le triangle onf, $\gamma = \beta + r$; et en considérant le triangle ons, i, ou $r = \beta + \alpha$. Ajoutant ces deux égalités pour éliminer r, il vient $\gamma - \alpha = 2\beta$. Or, les angles α, β, γ étant infiniment petits, ainsi que l'arc An, on peut les prendre à la place de leur tangente trigonométrique, et écrire

$$\gamma = \frac{\overline{\text{A}n}}{f\text{A}} = \frac{\overline{\text{A}n}}{p'}, \qquad \alpha = \frac{\overline{\text{A}n}}{\text{A}s} = \frac{\overline{\text{A}n}}{p}, \qquad \text{et} \quad \beta = \frac{\overline{\text{A}n}}{\text{R}}.$$

Substituant dans l'équation $\gamma - \alpha = 2\beta$, elle devient, en posant $\text{R} = 2a$:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{2}{\text{R}} = -\frac{1}{a}. \quad \text{On trouverait} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}, \qquad [1]$$

dans le cas d'un miroir convexe. Le signe (—) indique que les longueurs a

et p', qui en sont affectées, sont comptées du côté opposé du miroir par rapport à p qui est positif. Ces longueurs sont positives quand il s'agit d'un miroir concave.

La formule que nous venons de trouver coïncide avec celle du nº 1925; elle montre que la valeur de p' reste la même, quel que soit le rayon incident considéré, puisque cette valeur ne dépend que de a, ou $\frac{1}{2}$R, et de p. Tous les rayons réfléchis iront donc couper l'axe sAo au point f, qui sera le *foyer* du point s.

Foyers conjugués. — Il résulte des lois de la réflexion que, si le point lumineux était en f, le point s en serait le foyer; c'est pourquoi les points s et f s'appellent collectivement *foyers conjugués*.

Foyer principal. — Dans le cas de rayons parallèles entre eux, on a $p=\infty$ et $p'=a$; le foyer est donc au milieu du rayon de courbure. On peut, du reste, démontrer directement ce résultat, comme nous l'avons fait en parlant de la réflexion de la chaleur (II,720). Le foyer des rayons parallèles se nomme *foyer principal*.

Ce qui précède s'applique à un miroir quelconque de révolution infiniment petit, dont sA serait l'*axe de révolution*; car la surface se confond au sommet A, avec sa sphère osculatrice.

1929. Aberration de sphéricité. — Quand le miroir sphérique n'est pas infiniment petit, mais seulement très petit, les rayons ne se rencontrent pas exactement au même point; mais ils se croisent dans un espace très petit, et forment la partie voisine du sommet, de la caustique de révolution dont nous avons parlé plus haut (1925). Ce phénomène constitue l'*aberration de sphéricité*, et est d'autant plus prononcé, que l'ouverture du miroir est plus grande par rapport à son rayon de courbure.

1930. discussion. — De la formule

$$[1] \quad \frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a}, \quad \text{on tire} \quad [2] \quad p'=\frac{pa}{p-a}, \quad \text{ou} \quad p=\frac{a}{1-\frac{a}{p}} \quad [3]$$

Posons d'abord $p=\infty$, ce qui revient à supposer que les rayons incidents sont parallèles, il vient $p'=a=\frac{1}{2}$R; les rayons réfléchis se croisent donc au foyer principal F (*fig.* 1417), situé au milieu du rayon Ao. — Si le point lumineux s se rapproche, p diminue, $a:p$ augmente, et, par conséquent, le dénominateur de la valeur [3] de p' diminue; donc, p' augmente, et le point lumineux et son foyer marchent l'un vers l'autre. — Quand on a $p=2a$, le point lumineux arrive au centre du miroir, et l'on trouve $p'=2a$; le foyer est donc aussi au centre. Si le point lumineux s'approche encore plus du miroir, p' augmentant toujours, le foyer passe au-delà du centre; et quand on a $p=a$, c'est-à-dire quand le point lumineux arrive en F, p' devient infini; les rayons réfléchis sont donc parallèles à l'axe du miroir.

Si p continue encore à diminuer, $a:p$ devient plus grand que l'unité, et la

valeur de p' est négative ; le foyer se forme alors derrière le miroir, et ne peut être produit que par le prolongement des rayons réfléchis ; ce sera un *foyer virtuel*, ou imaginaire. En écrivant la valeur de p' sous la forme $p' = -\frac{a}{\frac{a}{p} - 1}$, on voit que la valeur absolue de p' diminue avec celle de p. Quand p est nul, il en est de même de p' ; le point lumineux et le foyer virtuel se confondent donc alors sur la surface du miroir.

Tous ces résultats peuvent se voir sur la figure; car, d'abord, le point lumineux venant de l'infini et se rapprochant du centre, l'angle d'incidence diminue; le rayon réfléchi se rapproche donc de la normale, et le point f s'avance vers le centre. En o, les deux rayons incident et réfléchi se confon-

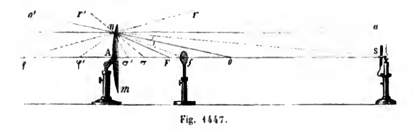


Fig. 1447.

dent. Le point lumineux dépassant le centre, le rayon incident passe au-dessous de la normale; le rayon réfléchi passera donc au-dessus. Ainsi, le point lumineux venant en f, son foyer conjugué sera en s. Quand le point lumineux viendra en F, les rayons réfléchis se dirigeront suivant na. Ce point venant en σ, l'angle d'incidence sera plus grand que Fno ; l'angle de réflexion devra donc être plus grand que ona, et le rayon réfléchi viendra en nr, au-dessus de na, et ne pourra couper l'axe qu'en φ, sur son prolongement, et d'autant plus près du miroir que le point σ en sera lui-même plus rapproché.

On voit que, dans le *miroir concave*, le foyer peut occuper tous les points de l'axe, excepté ceux qui sont entre le foyer principal et le miroir.

On peut vérifier la plupart de ces résultats, au moyen d'une bougie munie d'un écran s, percé d'un petit trou qui représente le point lumineux ; on cherche sur un autre écran en papier, f, la position du foyer, quand il est réel.

Déplacements relatifs des foyers conjugués. — L'expérience montre que p' augmente très lentement quand p, d'abord très grand, diminue rapidement; puis p' augmente très rapidement pour de petites variations de p quand le point s a dépassé le centre. Pour nous rendre compte de ces variations relatives, construisons la courbe que représente la formule [1], en prenant pour abcisses les valeurs de p, et pour ordonnées celles de p'. La formule peut se mettre sous la forme $pp' = ap + ap'$, et l'on voit qu'elle représente une hyperbole équilatère mm', nn' (*fig.* 1448) passant par l'origine et dont les

asymptotes AA, A'A', parallèles aux axes des coordonnées, sont à des distances de ces axes égales à a; car p ou p' sont égaux à a, quand p' ou p sont infinis. Le sommet o' de l'hyperbole correspond aux valeurs $p=2a$, $p'=2a$. La branche supérieure représente les valeurs de p', quand celles de p varient de $p=\infty$ à $p=a$. Si p devient moindre que a, p' devient négatif, et ses valeurs sont représentées par la partie $n'o$ de la seconde branche. Quant à la partie on, nous allons voir à quelles valeurs de p' elle correspond.

Cas du miroir convexe. — Pour que la formule réponde au miroir convexe, il faut faire R, ou a, négatifs. Alors la valeur de p' devient $p'=\dfrac{-a}{1+\dfrac{a}{p}}$; cette valeur étant toujours négative, le foyer sera toujours virtuel. Si l'on a $p=\infty$, il vient $p'=-a$; puis p diminuant, p' diminue aussi, et devient nul en même temps que p. Ces résultats peuvent se trouver par construction géométrique : supposons que le miroir mn (*fig.* 1447) soit poli sur la face convexe et que φ soit le point lumineux, un rayon incident φn se réfléchira suivant nr' et ne pourra rencontrer l'axe que sur son prolongement, en σ. On voit aussi que le foyer, toujours virtuel, ne pourra se former que dans l'espace AF. Si nous voulons représenter les valeurs de p' par les ordonnées d'une courbe, il suffira, dans l'équation $pp'=ap+ap'$, de faire p négatif, pour exprimer que le point lumineux passe derrière le miroir concave, c'est-à-dire que ses rayons se réfléchissent sur la partie convexe, tout en laissant à a sa valeur positive, puisqu'il est toujours compté du côté où p est positif. Alors l'équation représente la portion on (*fig.* 1448) de la branche inférieure de l'hyperbole. p' est positif et augmente avec la valeur absolue de p, jusqu'au maximum $p'=a$ qui correspond à $p=\infty$.

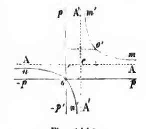


Fig. 1448.

Un miroir convexe peut donner un foyer réel, quand les rayons incidents sont *convergents*. Dans ce cas, il faut prendre p négatif, en même temps que R, pour indiquer que le point de concours des rayons incidents prolongés se trouve derrière le miroir. La valeur de p' devient alors $p'=\dfrac{-a}{1-\dfrac{a}{p}}$, qui devient positive quand on a $p<a$, ou quand les rayons sont assez convergents pour que leur point de rencontre se fasse entre le foyer principal et le miroir. Si l'on a $p=a$, les rayons réfléchis sont parallèles. Ces résultats se voient facilement par la géométrie; on peut les vérifier par l'expérience, au moyen de rayons convergents, fournis par un miroir concave.

Si le miroir était plan, on aurait $R=\infty$ et $a=\infty$; alors la formule donne $p=-p'$. Le foyer est alors situé, comme nous l'avons vu (1901), sur

la perpendiculaire au miroir, laquelle représente l'axe correspondant au point lumineux, puisqu'elle peut être regardée comme une normale à une sphère dont le rayon est devenu infini.

1031. Mesure du rayon des miroirs sphériques. — Quand on veut appliquer la formule des miroirs, il faut connaître leur rayon de courbure. Dans le cas d'un miroir concave, il n'y a qu'à le présenter aux rayons solaires, qui peuvent être considérés comme parallèles, et à chercher, avec un petit écran, la position du foyer principal, où se croisent les rayons réfléchis. La plus courte distance de ce point au miroir est égale à la moitié du rayon.

Quand le miroir est convexe, on applique une bande de papier noir sur sa surface, suivant un grand cercle. Dans cette bande sont ménagés deux petits trous *a*, *b* (*fig.* 1449), qui laissent voir la surface, et qui sont assez rapprochés

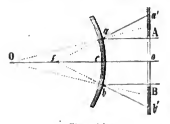


Fig. 1449.

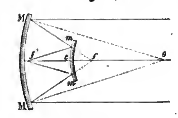


Fig. 1450.

pour qu'on puisse regarder l'arc *ab* comme se confondant avec sa corde. On expose ce miroir aux rayons solaires, en plaçant au devant, un écran *a'b'* parallèle à la corde *ab*, et percé d'une large ouverture AB. Les deux pinceaux réfléchis en *a* et *b* viennent illuminer l'écran en *a'*, *b'*. On mesure, avec un compas, les distances *ab*, *a'b'*, et A*a*. Le point *f*, où se rencontrent les prolongements des rayons réfléchis *aa'*, *bb'* est le foyer principal. Or, les triangles semblables *fab*, *fa'b'*, donnent $ab : a'b' = fc : fo = fe : fc + a\mathrm{A}$; d'où l'on tire la valeur de *fc*, qui est la moitié du rayon cherché. — Si l'on éloigne l'écran de manière que *a'b'* soit égal au double de *ab*, on a immédiatement et sans calculs, $cf = a\mathrm{A}$.

On peut encore opérer, sans modifier la surface du miroir convexe. On place ce miroir, *mm* (*fig.* 1450), en présence d'un miroir sphérique concave de plus grandes dimensions, MM, dont on connaît le rayon, de manière que les axes principaux se confondent et que les surfaces réfléchissantes soient en regard. On fait ensuite tomber les rayons solaires sur le miroir concave, parallèlement à l'axe commun. Ces rayons, réfléchis une seconde fois par le miroir *mm*, font un foyer réel en *f*, à une distance *cf* que l'on mesure. En appliquant la formule des miroirs, aux rayons *convergents* qui tombent sur *mm*, on a $\frac{1}{cf} - \frac{1}{cf'} = \frac{2}{r}$. *cf* étant égal à la distance focale du miroir MM, moins la distance des deux miroirs, il n'y a que *r* d'inconnu dans cette équation.

1932. Images au foyer des miroirs sphériques concaves. — Considérons un objet *ab* (*fig.* 1451) placé au-delà du foyer principal du miroir sphérique concave *mm'*, supposé très petit par rapport à son rayon; tous les rayons lumineux partant du point *a*, et tombant sur le miroir près de l'axe *aOe*, iront, après la réflexion, se croiser au point *a'*, foyer conjugué du point *a*. Le point *b* ira de même faire son foyer en *b'* sur son axe *bOd*, le point *c* en *c'* sur l'axe *cO*, et ainsi des autres points de l'objet *ab*. Si donc on place en *a'b'* un écran blanc, chaque foyer illuminera un point de l'écran, ce point renverra cette lumière d'une manière diffuse en la faisant diverger, et l'on verra sur cet écran une image de l'objet *ab* avec la couleur et l'éclat relatif de ses différents points.

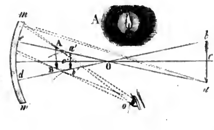


Fig. 1451.

On voit que cette image sera *renversée*; elle sera située entre le foyer principal et le centre, quand l'objet sera au-delà de ce dernier point, et au-delà du centre quand l'objet sera entre le foyer principal et le centre. La position de l'image sera toujours donnée par la formule [1] (1928). Si l'objet était entre le foyer principal et le miroir, l'image serait *virtuelle*; elle n'existerait donc pas en réalité et ne pourrait être reçue sur un écran. Il en est toujours ainsi quand le miroir est convexe.

1933. Grandeur de l'image. — L'image réelle, toujours renversée, est tantôt plus petite, tantôt plus grande que l'objet; sa grandeur ne dépend que du rayon de courbure du miroir, et de la distance de l'objet. Pour calculer le rapport entre les hauteurs de l'objet et de son image, désignons toujours par p et p' leurs distances au miroir, par D et D' leurs hauteurs, et par $2a$ le rayon de courbure. Les triangles semblables aOb, $a'Ob'$ (*fig.* 1451) donnent

$$\frac{ab}{a'b'} = \frac{Oa}{a'O}, \quad \text{ou} \quad \frac{D}{D'} = \frac{p-2a}{2a-p'}; \quad \text{ou} \quad \frac{D}{D'} = \frac{p-a}{a},$$

en remplaçant p' par sa valeur $p'=ap : (p-a)$ (1930). On voit que le rapport D : D' augmente en même temps que p; par conséquent, D' est d'autant plus petit par rapport à D que l'objet est plus éloigné du miroir. Tant que l'objet est-au-delà du centre, on a $p>2a$, et D' est toujours plus petit que D. Si l'objet est au centre, on a $p=2a$, et $D=D'$. Si p' est entre le centre et le foyer principal, on a $p<2a$; et D' est plus grand que D, et d'autant plus que p est plus petit. Si p est égal à a, on a $D : D'=0$; l'image est donc infinie, en même temps qu'elle est située à l'infini. Si, enfin, l'on a $p<a$, le rapport devient négatif; ce qui veut dire que l'image n'existe pas; et, en effet, elle est alors virtuelle.

Tous ces résultats se vérifient facilement par l'expérience, qui se fait très commodément avec la flamme d'une bougie, dans une chambre obscure.

1934. Effets de l'aberration de sphéricité. — Nous avons supposé. dans ce qui précède, que le miroir était très petit par rapport à son rayon de courbure. S'il n'en était pas ainsi, les rayons tombant sur des points éloignés de l'axe considéré, appartenant à un même cercle normal à cet axe, se croiseraient sur cette ligne en un point plus rapproché du miroir (1922), et jetteraient ensuite, en divergeant, une lumière étrangère sur l'écran placé au foyer des rayons réfléchis près de l'axe. Cette lumière rendrait l'image moins nette, par l'aberration de sphéricité. On peut reconnaître l'influence de cette aberration, par l'expérience suivante : on forme l'image d'une bougie au foyer d'un miroir concave à grande ouverture, et l'on voit que cette image est entourée d'une auréole lumineuse qui l'empêche de se détacher aussi vivement (A *fig.* 1451). Si alors on dispose un écran annulaire, qui intercepte les rayons réfléchis près des bords du miroir, l'auréole disparaît, et l'image devient plus nette. Si, au contraire, on intercepte avec un écran circulaire, les rayons qui tombent près de l'axe, l'image devient confuse, et pour l'avoir bien nette, il faut rapprocher l'écran.

1935. IMAGES VUES DANS LES MIROIRS SPHÉRIQUES. — L'image réelle formée par un objet suffisamment éloigné d'un miroir sphérique concave, peut être vue directement, par un observateur plus éloigné du miroir que l'image. En effet, chaque point de cette image étant le lieu où se croisent les rayons réfléchis, provenant du point correspondant de l'objet, devient le point de départ de rayons divergents qui, entrant dans l'œil, feront voir ce point comme s'il était un centre lumineux; et l'*image aérienne* de l'objet sera vue comme si elle était un objet matériel. Les images virtuelles formées dans les miroirs convexes et dans les miroirs concaves quand l'objet en est plus près que le foyer principal, peuvent aussi être vues, de même que les images virtuelles des miroirs plans. Comme l'ouverture du miroir n'est pas ordinairement assez petite pour qu'il n'y ait pas d'aberration de sphéricité, celle-ci joue un rôle dont il nous faudra tenir compte dans l'examen que nous allons faire des différents cas qui peuvent se présenter.

I. Miroirs concaves. — Il y a deux cas à examiner : 1° si l'objet est situé entre le foyer principal et le miroir, l'image est vue derrière le miroir; elle est grossie et droite (c'est-à-dire non renversée), quelle que soit la distance de l'œil. Soit O (*fig.* 1452) le centre du miroir, et AB l'objet. Considérons à part le point A, et menons l'axe AO qui lui correspond. Les rayons émanant de ce point et réfléchis par le miroir, iront former derrière lui une caustique virtuelle dont le sommet sera tourné vers le centre (1926). Pour obtenir les rayons réfléchis qui entrent dans l'œil, il faudra mener, des différents points de la pupille, des tangentes à la surface caustique, et joindre au point A, les points de rencontre de ces tangentes avec le miroir. On obtient ainsi le faisceau réfléchi AiO. Comme la pupille est très petite, les points de contact des diffé-

rents rayons tangents qui entrent dans l'œil se confondent sensiblement en un même point A', où l'on voit l'image du point A. De même, l'image du point B se verra en B' ; celle du point C en C', etc.

L'image sera généralement déformée, les points de contact A', C', B'..... n'étant pas à la même distance des sommets des caustiques correspondantes, et l'œil n'occupant pas la même position par rapport à chacune d'elles. Remarquons aussi, que ces points de contact dépendant de la position de l'œil, deux observateurs ne verront pas la même image. Si même on est assez près du miroir pour que la distance des deux yeux ne soit pas négligeable, chaque œil recevra des rayons venant de points de contact différents, et l'on verra deux images. — Tous ces résultats se vérifient par l'expérience.

2° La figure 1451 représente la marche des rayons dans le cas où le point lumineux est au-delà du foyer principal. Il faut que l'œil *o* soit placé plus loin

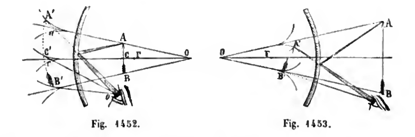


Fig. 1452. Fig. 1453.

que l'image, de manière à recevoir des rayons divergents. L'image AB est alors en avant du miroir, renversée, et plus petite que l'objet s'il est au-delà du centre, et plus grande s'il est en deçà. On voit qu'elle ne sera pas, en général, à la même place que celle que l'on recevrait sur un écran, en *a'b'*.

II. Miroirs convexes. — Dans ce cas, l'image est toujours droite et plus petite que l'objet. La *figure* 1453 représente la construction à faire pour trouver la position de l'image. Comme celle-ci est très petite, la situation de l'œil n'a qu'une faible influence sur le lieu qu'elle occupe.

Remarque. — Il se présente ici une question sujette à controverse : indépendamment du pinceau tangent en A' (*fig.* 1452), l'œil reçoit des rayons qui semblent émaner du point *a* de l'axe, et proviennent de la caustique linéaire formée par les rayons qui se réfléchissent sur les diverses circonférences perpendiculaires à OA (1923). L'œil reçoit donc deux pinceaux coniques dont les axes se confondent, l'un ayant son sommet en A', et l'autre en *a*, et la question est de savoir auquel de ces deux points on rapportera la position de l'image du point A. Newton admettait que l'image était vue au milieu de la distance A'*a*. D'autres physiciens admettent qu'elle est vue au point *a* de l'axe, et il n'y a pas plus de motifs pour admettre l'une de ces opinions que l'autre. Remarquons que la distance A'*a* est très petite, et que les degrés de divergence

des rayons partis de A′ et de *a* diffèrent tellement peu, que l'œil ne peut guère apprécier la différence qui existe entre eux ; il est donc bien probable qu'il rapporte la position de l'image à un point quelconque de la longueur A′*a*.

1936. Applications. — Les paysagistes se servent souvent de miroirs sphériques *convexes* pour obtenir l'image réduite du paysage qui leur sert de modèle. On dispose quelquefois dans les jardins, des ballons de verre étamés en dedans, ou en verre noir bien poli, nommés *globes périscopiques*, dans lesquels les objets viennent se peindre sous des dimensions assez petites pour qu'on puisse en saisir l'ensemble d'un seul coup d'œil. — C'est à la lumière du jour réfléchie dans la direction de l'œil, et resserrée en un mince faisceau, qu'est due cette tache brillante qui se voit sur toute surface convexe bien polie. L'écume, formée de petites bulles sphériques, présente une multitude de points brillants qui, étant très rapprochés, la font paraître blanche. Cependant, quand le liquide est coloré, l'écume participe à sa couleur, certains rayons réfléchis sur des bulles placées au-dessous des autres, devant traverser l'enveloppe colorée qui forme celles-ci. Si l'écume est éclairée par de la lumière colorée, au lieu d'être blanche, elle présente la couleur de cette lumière.

Fig. 1454.

On fait souvent usage du miroir *concave*, sous le nom d'*œil de bœuf*, pour voir son image grossie, en se plaçant à une distance moindre que la moitié du rayon. Porta a perfectionné sa chambre noire (1874), en recevant sur un miroir concave placé dans l'intérieur, les rayons venant des objets extérieurs et pénétrant par une large ouverture. Les images renversées des objets étaient reçues sur un écran placé un peu au-dessus de l'ouverture, à une distance convenable du miroir.

Bouquet magique. — On fait souvent une expérience curieuse au moyen de l'image *aérienne* qui se produit au-delà du centre d'un miroir concave, quand l'objet est situé entre le centre et le foyer principal. Un piédestal (*fig.* 1454) est placé en avant d'un miroir sphérique concave *mn*, dont le centre est en *o*, et une fleur, ou une statuette, bien éclairée placée en *f* sur un fond noir, vient faire une image réelle en *f′*, pour l'œil placé en *a*, de manière à faire croire à la présence d'un objet matériel. Il faut remarquer que la portion de sphère *mn* étant très éloignée de l'axe *of*, la distance *f′o* ne peut être donnée par la formule des miroirs. Le point *f′* appartient à la partie *a* de la caustique de la figure 1445.

IV. De quelques miroirs courbes non sphériques.

1937. Miroirs paraboliques. — Quand des rayons lumineux tombent sur la surface d'un miroir parabolique, parallèlement à son axe de révolution, ils donnent des rayons réfléchis qui se rencontrent tous exactement au foyer géométrique du paraboloïde, quelle que soit la grandeur du miroir. Ce résultat est une conséquence immédiate des propriétés de la parabole, et s'explique ici, comme dans le cas des rayons de chaleur (II,719). Si les rayons tombent sur la surface concave du miroir, le foyer est réel ; il est virtuel dans le cas contraire. Quand le point lumineux est placé au foyer du miroir, les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe. Ils seraient dans le même cas si la surface convexe recevait des rayons convergents ayant leur point de convergence au foyer. — On a tiré parti de cette propriété pour rétrécir un faisceau parallèle, de manière à en augmenter l'intensité. Le faisceau, *aa'* (*fig.* 1455), est d'abord reçu parallèlement à l'axe, par un premier miroir parabolique concave MM, et vient tomber en convergeant, sur la surface convexe d'un second miroir *mm* dont le foyer *f* coïncide avec celui du premier. Les rayons forment encore un faisceau parallèle, mais plus étroit, qui passe par une ouverture *oo* ménagée au sommet du premier miroir. Des miroirs sphériques donneraient le même résultat, mais à la condition de n'avoir qu'une très petite ouverture par rapport à leur rayon de courbure.

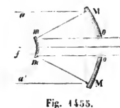


Fig. 1455.

Du reste, comme dans la double réflexion il y a une grande perte de lumière, on se sert habituellement de lentilles de verre pour atteindre le même but.

Si les miroirs paraboliques sont préférables aux miroirs sphériques quand on veut concentrer des rayons parallèles en un seul point, ils leur cèdent en exactitude quand il s'agit de rayons divergents. Alors l'aberration se produit, et est plus marquée qu'avec les miroirs sphériques, surtout quand le point lumineux n'est pas situé sur l'axe de révolution. Cependant un objet lumineux peut faire une image nette en avant d'un miroir parabolique, quand il en est très éloigné, et que ses différents points sont très rapprochés de l'axe.

1938. Phares de réflexion. — L'application la plus importante des miroirs paraboliques est celle qu'en ont faite Teulère et Borda, aux phares de réflexion. Une lampe à cheminée, à une ou plusieurs mèches concentriques, est placée au foyer du miroir, dont l'axe est horizontal, de manière que la lumière est réfléchie en un faisceau cylindrique qui ne perd pas de son intensité par l'effet de la distance. Plusieurs miroirs semblables, disposés circulairement

autour d'un même support, éclairent tous les points de l'horizon. En faisant tourner le support sur lui-même au moyen de rouages à poids, on peut faire que le faisceau lancé par un même miroir parcoure successivement tous les points de l'horizon.

Les miroirs paraboliques ont une portée extraordinaire. MM. Biot et Arago ont reconnu qu'un miroir de $0^m,81$ d'ouverture lance de la lumiére, visible avec une lunette à une distance de 40 lieues. Il est essentiel que tous les points de la flamme soient aussi près que possible du foyer mathématique. Cela ressort des expériences suivantes, faites par Arago, Charles, et de Rossel : deux miroirs de $0^m,80$ d'ouverture, étaient installés sur la butte Montmartre, et l'un d'eux ayant à son foyer un bec d'Argant de $13^{mm},5$ de diamètre brûlant 49 grammes d'huile par heure, se voyait de Montlhéri, distant de 7 lieues, comme une étoile de première grandeur. L'autre miroir, muni d'un bec de diamètre double et brûlant le double d'huile, produisit beaucoup moins d'effet ; car il fallait cacher avec un écran, environ le tiers de la surface du premier miroir, pour que les effets fussent égaux.

Malgré la puissance des miroirs paraboliques, la perte de la moitié environ de la lumière dans la réflexion, et l'altération rapide de leur surface métallique, ont fait préférer généralement pour les phares, les appareils de *réfraction*, dont nous parlerons plus tard.

1939. Miroirs elliptiques et hyperboliques. — On peut se demander quelle forme devrait avoir la méridienne d'un miroir de révolution pour que les rayons réfléchis, venant d'un point de l'axe, se croisent exactement au même point. Il est facile de voir que si le miroir est *concave*, la méridienne sera une ellipse tournant autour de son grand axe, et dont les foyers géométriques seront occupés par les foyers lumineux conjugués ; car nous savons que la normale à l'ellipse divise en deux parties égales l'angle des rayons vecteurs. Du reste, il faudra un miroir particulier pour chaque distance, p, du point lumineux au miroir. La distance des foyers de l'ellipse méridienne devra être $D = p - p'$. Le demi-grand axe de cette ellipse sera égal à $p' + \frac{1}{2} D = \frac{1}{2}(p+p')$.

Si le miroir est convexe, sa surface devra former un hyperboloïde de révolution autour de l'axe transverse, dont le point lumineux et son foyer virtuel devront occuper les foyers géométriques. La distance de ces foyers sera $p + p'$, et le demi-axe transverse, $\frac{1}{2}(p - p')$.

Si l'on suppose les rayons lumineux parallèles à l'axe, il faudra faire $p = \infty$, et le grand axe deviendra infini, pour le miroir elliptique comme pour le miroir hyperbolique ; on retrouvera donc le miroir parabolique.

Les miroirs elliptiques et hyperboliques peuvent donner des images focales nettes quand les objets lumineux sont trés éloignés du miroir, et leurs différents points très rapprochés de l'axe de révolution. Il y a dans ce cas, une

aberration de courbure, qui devient insensible quand l'ouverture du miroir est très petite.

1940. Miroirs cylindriques et coniques. — Supposons un miroir dont la surface soit un cylindre droit. L'image d'un corps placé en avant de ce miroir aura les mêmes dimensions que ce corps, dans le sens des arêtes. Mais ces dimensions seront altérées, dans le sens transversal. En effet, les rayons qui se réfléchissent sur une même arête sont dans le même cas que s'ils se réfléchissaient sur un miroir plan linéaire, et ceux qui se réfléchissent sur une section droite, sont dans le même cas que s'ils tombaient sur la circonférence d'un grand cercle d'un miroir sphérique de même rayon que la base du cylindre. Si donc le miroir est convexe, l'image sera rétrécie perpendiculairement aux arêtes ; et élargie, si le miroir est concave, et l'objet placé à une distance moindre que la moitié du rayon de la base.

Dans un miroir conique convexe, l'image, conservant toujours sa grandeur dans le sens des arêtes, sera rétrécie dans le sens transversal, et d'autant plus que les rayons se réfléchiront plus près du sommet. De sorte que l'image prendra une forme pyramidale.

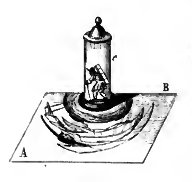


Fig 1456.

1941. Anamorphoses par réflexion. — On entend par *anamorphoses*, des figures tellement déformées, quoique suivant des règles déterminées, qu'on n'y voit que des traits bizarres et confus, tandis qu'elles présentent un dessin régulier quand on les regarde sous certaines conditions, par exemple quand on les voit par réflexion dans des miroirs courbes. On se sert le plus ordinairement, pour cela, de miroirs cylindriques et de miroirs coniques.

1° Miroirs cylindriques. — Supposons un miroir cylindrique convexe *a* (*fig.* 1456) posé par sa base sur un carton AB, sur lequel est tracé un dessin disposé circulairement autour de cette base. L'œil étant placé en avant du miroir, chaque point du dessin ira faire son image derrière la surface réfléchissante, et entre l'axe du cylindre et sa surface. Les images des différents points seront donc resserrées dans un espace qui ne dépassera pas le diamètre du cylindre, mais les traits du dessin seront étrangement déformés, surtout parce que l'œil étant placé au-dessus de la surface du carton AB, les rayons partant d'un même point sont réfléchis sur le contour d'une section oblique, dont l'obliquité dépend de la position du point considéré, ce point et l'œil devant toujours être dans le plan d'incidence. Si maintenant on suppose que le carton contienne, non plus un dessin régulier, mais une *anamorphose*

tracée suivant certaines régles, on conçoit que les traits déformés par réflexion sur le miroir pourront former un dessin régulier. C'est ainsi que l'image vue dans le miroir *c* représente un personnage, que l'anamorphose tracée sur le carton AB, permet à peine de soupçonner.

2° **Miroirs coniques**. Le miroir conique *c* (*fig.* 1457) est posé au centre d'un carton sur lequel on a tracé un dessin disposé circulairement. Des rayons partant des différents points *a*, *b*..., du dessin, et entrant dans l'œil placé sur le prolongement de l'axe du cône, se réfléchissent suivant *a'*, *b'*..., dans des directions dont le prolongement rencontre toujours la base du cône. De plus, les rayons venant des points les plus éloignés du centre doivent, pour aller à l'œil, se réfléchir sur les points les plus rapprochés du sommet *c*; leurs images seront donc les plus rapprochées de l'axe du cône. On conçoit donc qu'une anamorphose dessinée sur le carton, pourra fournir une image réguliére, comme on en voit un exemple au bas de la figure.

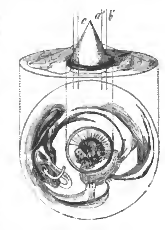


Fig. 1457.

Pour construire l'anamorphose devant donner un dessin déterminé, après avoir tracé ce dessin dans un cercle représentant la base du cône, on mène un diamètre quelconque, et l'on reporte les points du dessin rencontrés par ce diamètre, sur la base d'un triangle représentant la section du cône par un plan passant par son axe et par le diamètre considéré. Ayant ensuite marqué sur le prolongement de cet axe le point où devra être placé l'œil, on le joint aux différents points du dessin marqués sur le diamétre, ce qui donne les rayons réfléchis sur l'arête du cône qui doivent faire voir ces points. Les rayons incidents correspondants se trouvent, au moyen des lois de la réflexion, et les points où ils rencontrent le diamétre prolongé, sont les points correspondants de l'anamorphose. On fait la même construction pour autant de diamètres que l'on veut, et l'on obtient ainsi des points assez rapprochés pour qu'il soit facile de les réunir par des traits continus.

CHAPITRE III.

DIOPTRIQUE.

Remus integer in tenui aquâ fracti speciem reddit. Poma per vitram adspicientibus multò majora sunt.

(SENEC *Natural. quest.*, liv. I, cap. III).

§ 1. — DE LA RÉFRACTION SIMPLE ET DE SES LOIS.

I. Réfraction dans les solides et les liquides.

1842. De la réfraction. — Quand un rayon de lumière passe obliquement d'un milieu homogène dans un autre milieu homogène de nature différente, ce rayon est dévié de sa direction primitive. En même temps, il se colore de diverses nuances. Le phénomène de la déviation est désigné sous le nom de *réfraction*, et la coloration, sous le nom de *dispersion*. Nous avons donc ici deux phénomènes distincts à considérer. L'étude du premier constitue la *dioptrique*, autrefois *anaclastique*. L'étude du second fait partie de la *chromatique*, qui sera l'objet du chapitre suivant.

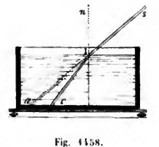


Fig. 1458.

Il y a des corps non homogènes, particulièrement les cristaux non symétriques autour d'un point, dans lesquels le rayon pénètre en se divisant en deux autres. Ce phénomène, désigné sous le nom de *double réfraction*, sera étudié dans un chapitre à part ; nous ne nous occuperons ici que de la *réfraction simple*.

1843. Expériences par lesquelles on constate la réfraction. — Posons d'abord quelques définitions. On nomme *point d'incidence* ou *point d'immersion*, le point par lequel le rayon incident traverse la surface de séparation des deux milieux. Ce point se nomme point d'*émersion* ou d'*émergence*, quand on considère le rayon comme sortant du premier milieu pour pénétrer dans le second. Le rayon dévié dans le second milieu se nomme *rayon réfracté*, et l'angle qu'il fait avec la normale menée par le point d'incidence à la surface de séparation, *angle de réfraction*.

Pour montrer le phénomène de la réfraction, on fait entrer dans la chambre

obscure un pinceau de rayons solaires que l'on fait tomber au fond d'un vase, en un point *a* (*fig.* 1458) que l'on marque avec soin. On remplit ensuite le vase d'eau, et l'on voit que le faisceau aboutit à un point *c* plus rapproché de la normale l*n*. Il y a donc eu déviation. Si le vase est une caisse rectangulaire à parois de verre, et si l'eau est trouble et l'air rempli de poussières en suspension, on peut suivre la marche des faisceaux *incident* et *réfracté*, et voir le changement de direction qui se fait à la surface du liquide.

Des corps plus ou moins réfringents. — Quand l'angle de réfraction est moindre que l'angle d'incidence, on dit que le milieu dans lequel pénètre le rayon, est *plus réfringent* que le milieu d'où il vient. Dans le cas contraire, c'est ce dernier milieu qui est le plus réfringent. En général, de deux corps, le plus réfringent est le plus dense. Mais il y a des exceptions, principalement pour les corps dont les densités diffèrent peu. Ainsi, l'*essence de térébenthine*, dont la densité n'est que 0,874 de celle de l'eau, est plus réfringente qu'elle, l'*alun* et le *sulfate de protoxyde de fer* ont même densité, et le second est plus réfringent que le premier; l'*huile d'olive* et le *borax*, dont les densités sont environ comme 1 : 2, sont également réfringents, car un rayon n'est pas dévié, en passant de l'une de ces substances dans l'autre.

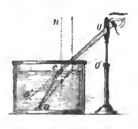


Fig. 1459.

1944. Explication de quelques phénomènes. — La réfraction sert à expliquer différents effets, qui peuvent être donnés comme des preuves indirectes de ce phénomène. 1° On met un corps *a* (*fig.* 1459) au fond d'un vase, et l'on place l'œil en *o*, de manière que le bord du vase se projette sur l'objet, c'est-à-dire que le pinceau *ao* qui entre dans l'œil, rase le bord du vase. On verse ensuite de l'eau, et l'on voit aussitôt que l'objet *a* paraît relevé en *a'*. C'est que le pinceau *ao* qui entrait dans l'œil, s'écartant de la normale en sortant dans l'air, qui est moins réfringent que l'eau, se dirige en *o'* au-dessous de l'œil; et un autre pinceau *aco*, s'écartant de la normale *cn* à sa sortie du liquide, entre dans cet organe, qui rapporte la position du point *a*, en *a'* sommet du tronc du cône que forme le pinceau émergent *co*. On peut aussi placer l'œil de manière que le corps *a*, caché par le bord du vase quand il est vide, soit vu après qu'on y a versé l'eau.

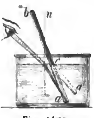


Fig. 1460.

2° Un bâton *ba* (*fig.* 1460) enfoncé dans l'eau, paraît brisé au point *e*, où il sort de ce liquide; c'est que son extrémité *a* est vue en *a'*, et ses autres points, dans l'espace *a'e*.

1945. Cas de l'incidence normale. — Quand un rayon traverse, dans une direction normale, la surface de séparation de deux milieux, il n'est pas

dévié. Ce résultat prouvé par l'expérience, peut se concevoir facilement ; car, quelle que soit la cause qui produit la réfraction, il n'y a pas de raison pour qu'un rayon normal soit dévié plutôt dans un sens que dans tout autre. Cependant certains physiciens, entre autres Vossius et Snellius, ont cru qu'il y avait réfraction avec les rayons normaux, parce qu'un point placé au fond d'un vase, paraît se rapprocher de l'œil qui le regarde dans la direction verticale, quand on remplit ce vase d'eau. Mais cela tient à ce qu'il part du point considéré, *a* (*fig.* 1461), non pas un rayon unique, mais un faisceau conique, dont l'axe seul est normal à la surface du liquide. Or, les rayons obliques, s'écartant de la normale après avoir traversé la surface en *e'e*, deviennent plus divergents, et le cône qui entre dans l'œil a son sommet en *o*.

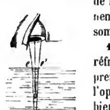


Fig. 1461.

1946. Lois de la réfraction. — Le phénomène de la réfraction était à peine connu des anciens ; cependant la première des expériences ci-dessus (1944) est décrite dans l'optique, attribuée à Euclide, et Ptolémée en donne assez bien l'explication. Aristote remarque que les rames plongées dans l'eau paraissent brisées, et Archimède a écrit sur les apparences d'un anneau plongé dans l'eau. R. Bacon attribue à Ptolémée la connaissance de la déviation des rayons des astres dans l'atmosphère. Alhazen qui a traité assez longuement de la réfraction, a cherché à l'expliquer par la décomposition du mouvement oblique du rayon incident, qui éprouve une résistance nouvelle en changeant de milieu. Il remarqua aussi que les angles de réfraction ne sont pas proportionnels aux angles d'incidence, et il construisit des tables donnant ces angles dans l'eau et dans le verre, pour des incidences variant de 10° en 10°, entre 0° et 80°. Un semblable travail avait été fait par Ptolémée, et a été repris par Vitellion. Kepler, dans sa dioptrique, qui avait principalement pour objet l'explication des lunettes grossissantes, admet la proportionnalité des deux angles, jusqu'à l'incidence de 30° ; et cette loi, vraie approximativement, comme nous allons le voir, le conduisit à des résultats exacts. Enfin, dans le XVIIe siècle, Willebrod Snellius découvrit les lois de la réfraction, que Descartes trouva de son côté et énonça, dans sa *dioptrique*, sous une forme plus simple, ce qui fait que ces lois portent ordinairement son nom.

Lois de Descartes. — 1° *Le rayon incident, le rayon réfracté et la normale, sont dans un même plan.* 2° *Pour les deux mêmes milieux, le rapport entre le* sinus *de l'angle d'incidence et le* sinus *de l'angle de réfraction est constant, quel que soit l'angle d'incidence.* La première loi était connue d'Alhazen. Snellius avait énoncé la seconde en disant que le rapport des sécantes des compléments des angles d'incidence et de réfraction est constant, ce qui revient à l'énoncé de Descartes.

Le meilleur appareil pour constater ces lois, est celui de la *fig.* 1462, dû à MM. Soleil et Silbermann. AA est un cercle vertical gradué, au centre duquel

se meuvent deux alidades *aa'*, *oe*, placées par derrière. L'alidade double *aa'* porte un miroir *m* destiné à renvoyer les rayons solaires dans la direction du centre, à travers un petit trou pratiqué dans un diaphragme qui ferme le tube *a*. En *a'* est un trait dans la direction du rayon du cercle, et sur ce trait est implantée une petite aiguille perpendiculaire à l'alidade. L'autre alidade *oe*, représentée de profil en *o'e'* est aussi munie d'une aiguille *e'* et d'un tube à diaphragme percé *t*. LL' est une échelle horizontale divisée en millimètres, et pouvant se fixer, au moyen d'une vis de pression, à différentes hauteurs sur le pied de l'instrument. En avant du cercle, est fixé un vase cylindrique en verre, dont l'axe horizontal passe par le centre, et qui est rempli de liquide jusqu'au niveau de ce centre. — Pour vérifier les lois de la réfraction, on fait arriver un rayon incident *ao* au centre du cercle, ce rayon entre dans le liquide en se réfractant, et en sort sans éprouver de nouvelle déviation, parce qu'il est normal à la surface de sortie. On dispose ensuite l'alidade *oe* de manière que le rayon réfracté passe par le trou du diaphragme du tube *t*, puis on place la règle LL' de manière que la petite aiguille *e'* de l'alidade, en touche le bord supérieur. La distance *ec* représente alors le *sinus* de l'angle de réfraction. On relève ensuite l'alidade *oe*, et faisant monter la règle jusqu'à ce qu'elle touche l'aiguille de l'alidade *aa'*, on obtient de même le *sinus* de l'angle *coa'*, qui est égal à l'angle d'incidence, puis on calcule le rapport de ces deux sinus. On répète ensuite l'expérience en choisissant d'autres angles d'incidence, et l'on trouve toujours le même rapport; ce qui vérifie la seconde loi. Quant à la première, elle résulte de ce que les rayons incident et réfracté passent par les ouvertures des diaphragmes, qui sont également distantes du plan du cercle vertical, et sont, par conséquent, dans un plan normal à la surface du liquide. — Pour avoir plus de précision, on peut mesurer les angles d'incidence et de réfraction au moyen des verniers *u* et *v*,*v'* adaptés aux alidades, et l'on cherche les *sinus* de ces angles dans les tables trigonométriques.

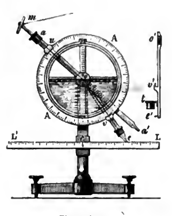


Fig. 1462.

On voit que l'appareil qui précède peut servir à vérifier les lois de la réflexion de la lumière; il suffit, pour cela, de porter l'alidade *oe* au-dessus de la surface réfléchissante du liquide, que l'on peut aussi remplacer par un petit miroir plan, et de mesurer les angles d'incidence et de réflexion. De même, l'appareil décrit plus haut pour constater les lois de la réflexion (1894, *fig.* 1404) peut servir à celles de la réfraction. On remplace alors le miroir central par un vase demi-cylindrique *io*, et l'on porte le curseur *e* en *e'*, pour recevoir le rayon

réfracté. Des règles divisées *rr*, pouvant glisser sur le diamètre vertical du cercle, donnent les *sinus* des angles d'incidence et de réfraction, quand on ne veut pas se servir des tables trigonométriques.

Les méthodes qui précèdent s'appliquent à une substance solide, en plaçant au centre du cercle, un demi-cylindre fait avec cette substance. Nous ferons connaître plus tard des méthodes très précises, au moyen desquelles on évalue le rapport entre les *sinus* des angles d'incidence et de réfraction dans une substance donnée. Ces méthodes, conduisant toujours au même rapport, quel que soit l'angle d'incidence employé, on y trouve une nouvelle démonstration des lois de Descartes, basée sur des mesures très précises.

1947. Indice ou rapport de réfraction. — Le rapport entre les *sinus* des angles d'incidence et de réfraction formés par un rayon qui passe du vide dans un milieu transparent, se nomme l'*indice*, le *rapport* ou le *coefficient de réfraction absolue* de ce milieu. Le plus grand indice de réfraction est égal à 3 ; il appartient au chromate de plomb. Celui de l'eau est 1,336, et celui du verre ordinaire 1,5 environ.

Quand le rayon de lumière passe d'un milieu pondérable dans un autre, le rapport des sinus se nomme l'*indice de réfraction relatif* des deux milieux.

1948. Loi de réciprocité. — Les rayons incident et réfracté étant construits, si l'on suppose que la lumière marche en sens contraire, c'est-à-dire si l'on prend le rayon réfracté pour rayon incident, le rayon incident primitif deviendra le nouveau rayon *réfracté*. Ce résultat est un cas particulier d'une loi générale d'optique qu'on peut énoncer ainsi : *La lumière qui traverse un système de corps transparents, suit toujours le même chemin, quel que soit le sens dans lequel elle se propage.* Cela posé, quand on donne l'indice de réfraction relatif à deux milieux, on prend toujours pour numérateur du rapport, le *sinus* du plus grand des deux angles formés avec la normale, à moins qu'on n'avertisse du contraire. Il en résulte que les nombres qui représentent les indices de réfractions sont toujours plus grands que l'unité.

Conséquence. — Il résulte de la loi de Descartes, que, si le plus grand des deux angles faits par un rayon lumineux avec la normale vient à augmenter, le plus petit augmentera d'une moindre quantité. En effet, d'abord, le plus grand sinus devra augmenter plus que le plus petit, pour que le rapport reste constant ; en outre, les arcs qui mesurent les angles sont plus grands que leur *sinus*, et ils en diffèrent d'autant plus que ces sinus sont plus grands ; l'arc le plus grand devra donc *à fortiori* plus augmenter que le plus petit.

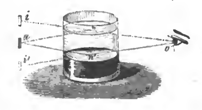
1949. Angle limite. — Quand un rayon passe dans un milieu plus réfringent que celui d'où il vient, une partie seulement pénètre dans le second milieu ; l'autre est réfléchie par la surface de séparation. C'est pour cela que les corps transparents projettent une ombre, comme on peut le reconnaître avec une lame de verre. La proportion réfléchie varie avec l'angle d'incidence (1898), et il passe toujours une partie des rayons incidents, quelle que soit leur obliquité. Mais quand le second milieu est moins réfringent que le

premier, il peut arriver qu'aucune portion de lumière ne franchisse la surface de séparation. En effet, si l'on éloigne peu à peu de la normale, le rayon incident *so* (*fig.* 1463), l'angle de réfraction *r* augmentera ; et comme il est toujours plus grand que l'angle d'incidence *i*, il deviendra égal à 90° avant que ce dernier n'atteigne cette valeur. Soit L*on* l'angle d'incidence qui correspond à l'angle de réfraction égal à 90°, le rayon réfracté *oc* sera couché sur la surface de séparation. Si maintenant on augmente encore l'angle d'incidence, comme l'angle de réfraction ne peut pas dépasser 90°, on ne peut prévoir ce qui arrivera.


Fig. 1463.

Réflexion totale. — L'expérience montre qu'aucune partie du rayon incident ne franchit alors la surface de séparation, et que le rayon *ao* se réfléchit *en totalité* dans le premier milieu, suivant *o*R, en obéissant aux lois ordinaires de la réflexion. C'est là le phénomène de la *réflexion totale*, découvert par Kepler.

On doit à Bouguer quelques expériences curieuses sur ce sujet. En comparant les quantités de lumière réfléchies sous diverses incidences à la seconde surface de lames transparentes, il reconnut que l'intensité de la lumière réfléchie, invariable tant que le rayon incident était éloigné de la normale, diminuait brusquement à partir d'une certaine valeur suffisamment petite de l'angle d'incidence ; c'est qu'une partie de la lumière passait alors au dehors.


Fig. 1464.

Pour montrer combien est grande la quantité de lumière réfléchie en dedans de l'eau quand l'angle d'incidence est très grand, il la comparait à la quantité que réfléchit le mercure. Pour cela, il versait de l'eau sur du mercure contenu dans un vase de verre (*fig.* 1464), et plaçait en *a* un corps blanc, à égale distance des deux niveaux *n*, *n'* ; l'œil étant placé en *o*, il voyait par réflexion en *n* et *n'*, deux images *i* et *i'* du corps, et ces deux images paraissaient également brillantes.

Bouguer croyait que $\frac{1}{4}$ environ de lumière était éteinte dans la réflexion totale ; mais nous verrons qu'il résulte d'expériences très précises d'Arago, que cette perte n'existe pas. Les mots *réflexion totale* sont donc bien l'expression exacte du phénomène.

Angle limite. — L'angle qui correspond au rayon réfracté couché sur la surface *oc* (*fig.* 1463) se nomme *angle limite* ; c'est le plus grand angle pouvant donner un rayon émergent dans le milieu le moins réfringent. La valeur de l'angle limite est nécessairement liée à l'indice de réfraction

relatif des substances considérées. Si n est cet indice, on a $\frac{\sin i}{\sin r}=n$, i étant toujours le plus grand des deux angles (1948). Quand cet angle est égal à 90°, l'angle r dans le milieu le plus réfringent devient l'angle limite θ ; et l'on a alors $\frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta}=n$, d'où $\sin \theta=\frac{1}{n}$. L'angle limite est donc d'autant plus grand que l'indice de réfraction est petit. Pour l'eau, il est de 48°35′ ; pour le verre, de 41° environ, moindre que la moitié d'un angle droit.

1950. Vérifications expérimentales. — Pour montrer la réflexion totale et l'angle limite, on se sert d'une cuve remplie d'eau (*fig.* 1465) dont le fond laisse passer une cheminée de verre *sc*, dans laquelle est une flamme. Un écran *ca* recouvre en partie la surface du liquide. Quand il n'y a pas d'eau dans la cuve, on peut, en plaçant l'œil en *o''*, voir la flamme. Mais quand il y a de l'eau, on ne peut plus l'apercevoir, si le bord *a* de l'écran est assez avancé pour que l'angle fait par le rayon *sa* avec la normale en *a* soit au moins égal à l'angle limite θ. Alors aucun des rayons rencontrant la surface libre du liquide ne peut émerger, les angles avec la normale allant en augmentant à mesure que le point d'incidence s'éloigne de *a*. Si alors, la paroi de droite de la cuve étant en verre, on place l'œil en *o*, on verra, par *réflexion totale*, l'image *s'* de la flamme. On aperçoit encore de la lumière quand on place l'œil en *o'*, dans le prolongement de la surface de l'eau ; cette lumière est produite par

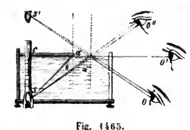


Fig. 1465.

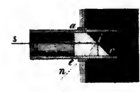


Fig. 1466.

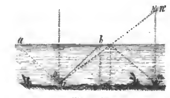


Fig. 1467.

les rayons émergents couchés sur la surface, provenant des rayons incidents qui forment l'angle limite θ.

Si l'on adapte un volet d'une chambre noire, un tube opaque (*fig.* 1466) fermé par une masse de verre dont la face *ae* tournée du côté du jour est perpendiculaire à l'axe du tube, tandis que la face opposée *ic* est taillée obliquement, aucune lumière ne pénétrera dans la chambre, si l'angle *ice* est plus petit que l'angle limite. En effet, le tube ne laissant passer que des rayons sensiblement parallèles à son axe, un rayon incident, *si*, pénètre dans le

verre sans éprouver de déviation, forme en *i*, avec la normale, un angle *nis* complémentaire de l'angle *ice*, et par conséquent plus grand que l'angle limite. Ce rayon éprouve donc la réflexion totale.

Il résulte encore de la réflexion totale, qu'un plongeur ayant l'œil en *o* (*fig.* 1467), ne recevra, des rayons venant de l'extérieur que ceux qui entreront par la base du cône *aob* dont l'angle est le double de l'angle limite. Il pourra recevoir néanmoins des rayons en dehors de ce cône ; mais ils proviendront de rayons incidents émanant d'objets tels que *n* situés au fond de l'eau, et ayant éprouvé la réflexion totale à la surface du liquide.

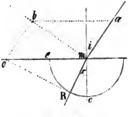


Fig. 1468.

1951. Construction du rayon réfracté. — Etant donné un rayon incident et l'indice de réfraction, proposons-nous de trouver, par nne construction géométrique, la direction du rayon réfracté. Soit *am* le rayon incident (*fig.* 1468). Décrivons une demi-circonférence, du point *m* comme centre, avec un rayon égal à 1 : *n*, *n* étant l'indice de réfraction. Menons *mb* perpendiculaire à *am*, inscrivons dans l'angle *bmo* une droite *ob* parallèle à *am* et de longueur égale à l'unité, et menons enfin du point *o* une tangente à la demi-circonférence. Si nous joignons le point de contact R au point *m*, *m*R sera le rayon réfracté. En effet, les triangles rectangles *bmo* en *om*R donnent

$$\overline{bo} = 1 = \overline{om} \sin \overline{omb} = \overline{om} \sin i, \quad \text{et} \quad \overline{m\text{R}} = \frac{1}{n} = \overline{om} \sin \overline{mo\text{R}} = \overline{om} \sin \overline{cm\text{R}}.$$

Egalant les valeurs de *om* tirées de ces deux égalités, il vient $\sin i = n \sin \overline{cm\text{R}}$; l'angle *cm*R est donc bien l'angle de réfraction, et *m*R, le rayon réfracté.

Quand le rayon pénétre dans un milieu plus réfringent que celui d'où il vient, la construction est toujours possible ; car le point *o* est toujours en dehors de la circonférence, dont le rayon 1 : *n* est plus petit que l'unité. Il y a donc toujours un rayon réfracté. Quand le second milieu est le moins réfringent, l'indice de réfraction est plns petit que l'unité, si l'on continue à prendre *i* pour angle d'incidence, et doit être représenté par 1 : *n*. Alors le rayon de la circonférence décrite est égal à *n*, et plus grand que l'unité. Pour que le point *o* tombe hors de cette circonférence, il faut que $\overline{om} = 1 : \sin i$ soit plus grand que *n*. Si l'on a $1 : \sin i = n$, le point *o* est en *e*, où se trouve en même temps le point de contact, et le rayon réfracté est dirigé suivant *me*. L'angle *i* est alors l'angle limite. Si l'on a $1 : \sin i < n$, le point *o* tombe dans l'intérieur de la circonférence, et il n'y a plus de rayon réfracté, comme nous le savions (1949).

Nous verrons plus tard que cette construction, due à Huyghens, découle naturellement de l'explication de la réfraction dans le systéme des ondulations.

1952. Réfraction diffuse. — Quand on regarde divers objets à travers un corps transparent, ces objets peuvent être vus hors de leur véritable place, mais on en distingue les contours, quoiqu'ils puissent être déformés. Chaque rayon, tout en subissant diverses déviations, conserve donc son individualité, et reste séparé des autres. Il en résulte qu'on ne voit pas un corps parfaitement transparent, et que si sa forme est telle que les objets au devant desquels il est placé ne paraissent pas déformés, on peut ignorer sa présence.

Quand le corps que traverse la lumière est terminé par des surfaces dépolies, ou est composé de parties très fines, de fibres agglomérées, comme l'albâtre, le papier, la corne, les rayons qui le traversent se mêlent, et sortent dans toutes les directions en chaque point d'émergence. Ces points se comportent donc comme des points lumineux, et c'est la surface que l'on voit, et non plus les objets placés derrière et d'où émane la lumière transmise. Dans ce cas, le corps est dit *translucide*. Quand il s'agit d'un corps transparent à surface dépolie, cette surface est couverte d'aspérités que les rayons incidents rencontrent sous une multitude d'angles différents, de manière à donner, dans un espace insensible, des rayons réfractés de toutes directions, comme dans la réflexion diffuse (1896). Quand le corps est composé de particules ou de fibres transparentes, les rayons qui passent à travers ces particules éprouvent des réfractions qui les dévient dans des directions très différentes dépendant de la forme de ces particules, et du point d'incidence ; ces déviations, répétées un grand nombre de fois, donnent aux rayons qui sortent dans un espace très petit, des directions très différentes. La mousse de bière, formée de bulles liquides parfaitement transparentes, et qui n'est que *translucide*, nous présente une image de ce qui se passe dans les corps composés de parties séparées par une substance de nature différente, qui est ici l'air qui remplit les bulles.

Si l'on remplit les vides qui séparent les particules dont est formé un corps, par un liquide qui réfracte la lumière de la même manière qu'elles, les rayons ne sont plus déviés irrégulièrement, et le corps devient transparent. C'est ce qui a lieu en partie, pour le verre dépoli dont on mouille la surface, l'hydrophane imbibée d'eau, le papier huilé. Si ces corps, étant très minces, sont appliqués sur les objets que l'on regarde à travers, on peut en distinguer assez bien les détails ; comme lorsqu'on appuie une feuille de papier mince sur un dessin que l'on veut calquer. C'est qu'il ne sort de chaque point de la feuille translucide, pour entrer dans l'œil, que les rayons provenant du point juxta-posé du dessin, rayons qui sont sensiblement parallèles entre eux et n'éprouvent qu'une faible diffusion en traversant une aussi faible épaisseur.

Les nuages qui voilent le soleil, quand ils ne sont pas trop épais, envoient de la lumière diffuse qui éclaire dans toutes les directions, de manière à ce qu'il n'y a plus d'ombres marquées. C'est pour cela que l'on voit plus clair au fond d'un puits, par un ciel nébuleux, que par un temps clair.

II. Réfraction atmospherique. — Mirage.

1953. Réfraction atmosphérique. — Les gaz réfractent la lumière, mais faiblement. Ce phénomène se remarque surtout sur les rayons des astres, pénétrant dans l'atmosphère. Comme l'air augmente graduellement de densité à mesure qu'on se rapproche de la surface de la terre, ces rayons sont infléchis en ligne courbe, et les astres paraissent plus élevés au-dessus de l'horizon qu'ils ne le sont réellement. Considérons, par exemple, une étoile placée dans la direction S (*fig.* 1469) un peu au-dessous de l'horizon du point *m* de la surface de la terre, et qui, par conséquent, ne pourrait être vue de ce point s'il n'y avait pas réfraction. Supposons l'atmosphère partagée en couches concentriques infiniment minces et dont la densité croît à mesure qu'on descend. Un rayon S*a*, en pénétrant dans la première couche d'air, se rapprochera de la normale *an''''*, et prendra la direction *ac*; en pénétrant en *c* dans la seconde couche, qui est plus dense que la première, il se rapprochera aussi de la normale *cn'''*, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il parvienne au point *m*, après avoir décrit une ligne brisée, qui se confond avec une courbe continue parce que les couches d'air sont infiniment minces. L'observateur placé en *m* verra alors l'étoile en S', dans la direction du dernier élément *rm* de la courbe. Cet astre paraîtra donc au-dessus de l'horizon, tandis que, en réalité, il se trouve un peu au-dessous. On a donné le nom de *solaire* à la courbe *am* : sa forme a beaucoup occupé les géomètres, depuis Lahire, Taylor et Bouguer qui l'ont, les premiers, étudiée.

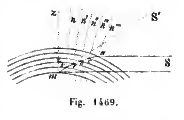


Fig. 1469.

La *réfraction atmosphérique*, ainsi nommée par M. Biot, avait été d'abord désignée sous le nom de *réfraction astronomique* quand il s'agissait des rayons des astres, et *de réfraction terrestre* quand ces rayons partaient d'objets situés à la surface de la terre. La réfraction atmosphérique est nulle pour les rayons verticaux, et d'autant plus prononcée pour les rayons obliques, qu'ils sont plus rapprochés de l'horizon, près duquel ils ont à traverser des couches d'air plus nombreuses, plus denses et plus inclinées sur leur direction. C'est pour cela que les étoiles circompolaires paraissent plus près du pôle à leur passage au méridien inférieur qu'à leur passage au méridien supérieur; que les constellations, la lune, le soleil paraissent aplatis dans le sens vertical, quand ils sont près de l'horizon, les rayons envoyés par les parties inférieures étant plus déviés que ceux qui viennent des parties supérieures, lesquels paraissent alors moins relevés que les autres [1]. — On a quelquefois observé

[1] Les constellations et les astres paraissent en même temps beaucoup plus grands près de l'horizon que près du zénith. Nous reviendrons plus tard sur cette illusion, en parlant du jugement de la grandeur des objets, lorsque nous étudierons la vision.

des éclipses totales de lune pendant que le soleil paraissait au-dessus de l'horizon ; par exemple, à Paris, le 19 juillet 1750. Les centres des deux astres et de la terre semblaient n'être pas en ligne droite, et ce fait avait beaucoup intrigué les astronomes. C'était la réfraction atmosphérique qui faisait paraître les deux astres en même temps au-dessus de l'horizon, au moment de l'éclipse. — La lueur rougeâtre qui illumine le disque lunaire pendant qu'il est éclipsé, est due aux rayons solaires infléchis dans l'atmosphère de la terre, et pénétrant dans le cône d'ombre qu'elle projette. — C'est à la réfraction des rayons lumineux dans l'air irréguliérement dilaté et en mouvement, qu'est dû le tremblement apparent des objets vus derrière une surface fortement échauffée, comme celle d'un poêle, ou une plaine frappée par le soleil.

Les objets trés élevés, comme les sommets des montagnes, paraissent plus haut qu'ils ne sont, les rayons qui arrivent à l'observateur placé dans la plaine étant infléchis en pénétrant dans les couches inférieures de l'atmosphère. Il est important de tenir compte de cet effet dans les mesures géodésiques, dont il peut affecter les résultats, d'erreurs importantes ; et c'est là une des causes qui font le plus souvent préférer le baromètre, pour la mesure des montagnes dont le sommet est accessible.

1954. Tables de réfraction. — La réfraction astronomique était connue des anciens ; Archiméde paraît y avoir le premier songé, et Ptolémée, puis Alhazen, reconnurent son influence sur la position des astres. Tycho-Brahé tenta plus tard de faire des corrections pour débarrasser les observations astronomiques de cette cause d'erreur. On a construit, depuis, des tables dites *astronomiques* ou de *réfractions*, où sont consignées les corrections à faire pour les différentes hauteurs apparentes au-dessus de l'horizon. Les premières sont dues à D. Cassini. La méthode qu'il dut employer consistait, d'aprés Montucla, à observer les hauteurs d'une étoile au-dessus de l'horizon, à différentes heures, et à les comparer aux hauteurs calculées, en partant de la régularité du mouvement diurne. La hauteur h du pôle étant elle-même influencée par la réfraction, on observe à quelle heure l'étoile se trouve à cette hauteur erronée ; la différence avec la hauteur calculée de l'étoile donne la correction à faire subir à h, mais seulement approximativement, puisque la hauteur de l'étoile est calculée au moyen de la hauteur du pôle, qui n'est pas exacte. On calcule ensuite les hauteurs de l'étoile plus exactement, en partant de cette hauteur du pôle corrigée, ce qui sert à lui faire subir une nouvelle correction, et ainsi de suite, en appliquant la méthode des corrections successives (1,26).

Comme il est impossible de construire des tables de degré en degré, surtout au-dessus de 45°, où la déviation n'est que de 59", on emploie des formules d'interpolation pour les hauteurs intermédiaires à celles qui ont été observées directement, ou bien l'on cherche par le calcul, en faisant certaines suppositions vraisemblables sur la constitution de l'atmosphère, une relation entre les distances zénithales et les réfractions. C'est ce qu'a essayé de faire D. Cassini ;



il suppose que l'atmosphère forme une couche homogène dans laquelle le rayon, dévié à son entrée, marche en ligne droite, et donnant à cette couche la densité et l'épaisseur convenables pour satisfaire aux réfractions observées directement, il parvient à calculer une table qui représente d'une manière remarquable tous les résultats de l'observation, jusqu'à 70° de la verticale. Mais plus près de l'horizon, cette table n'est plus exacte. Newton a aussi déduit de calculs mathématiques, une table de réfractions qui montre que, pour les faibles distances zénithales, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux *tangentes* de ces distances. Enfin, Bradley a énoncé cette loi générale, dont Lagrange a donné la démonstration mathématique, que, dans un même état de l'air, les réfractions sont proportionnelles aux *tangentes* des distances zénithales apparentes, diminuées d'un multiple de la réfraction elle-même. Le multiplicateur varie avec l'état de l'atmosphère au moment de l'observation ; mais comme il affecte une quantité très petite, on se contente d'adopter une valeur moyenne, qui est 3,5. Pour donner une idée de la grandeur de la réfraction astronomique, nous extrayons quelques résultats des tables déduites des formules de Laplace. Ces résultats se rapportent à un état moyen de l'atmosphère ; ils varient un peu quand la température et la pression changent, mais ils sont indépendants de l'état hygrométrique, quand on observe à plus de 10 à 15° au-dessus de l'horizon. Les nombres consignés dans les colonnes des réfractions, sont à retrancher des distances zénithales observées, quand on veut faire la correction.

DISTANCES ZÉNITHALES apparentes.	RÉFRACTIONS.	DISTANCES ZÉNITHALES apparentes.	RÉFRACTIONS.	DISTANCES ZÉNITHALES apparentes.	RÉFRACTIONS.
1°	1",0	30°	33",6	70°	2',38",8
5	5,1	40	48,9	80	5.19,8
10	10,3	50	1'.9",3	85	9.54,3
20	21,2	60	1.40,6	90	33.46,3

On voit que la réfraction près de l'horizon étant de 33', et le diamètre apparent du soleil et celui de la lune, de moins de 32', ces astres pourront être visibles pendant qu'ils seront entièrement au-dessous de l'horizon.

A partir de 70 à 75°, les résultats ne peuvent être employés avec sûreté, à cause des irrégularités accidentelles dans la constitution des couches inférieures de l'atmosphère. Aussi, les astronomes évitent-ils autant que possible d'observer à une trop grande distance du zénith. Cette irrégularité des couches d'air dans la direction de l'horizon est attestée par les déformations que l'on observe de temps à autre dans le soleil quand il est très bas, ou dans les objets

très éclairés situés à l'horizon. On voit dans la figure 1470, quelques formes bizarres du soleil près de se coucher, observées à Dunkerque, par MM. Biot et Mathieu.

1955. DU MIRAGE. Le *mirage* est un phénomène atmosphérique qui fait apercevoir une image symétrique et renversée des objets placés à la surface du globe, comme s'il y avait une nappe d'eau entre ces objets et leur image. On l'observe surtout dans les plaines sablonneuses échauffées par le soleil. Il est fréquent dans l'Arabie et l'Egypte ; le Koran compare au mirage (*serab*) tout ce qui est trompeur. Ce phénomène, connu dès la plus haute antiquité, est resté longtemps sans explication. M. Huddart paraît en avoir entrevu la cause ; et Monge a donné une théorie complète de ce curieux météore, dont il fut souvent témoin lors de la campagne d'Egypte, en 1798. La Basse-



Fig. 1470.

Egypte forme une vaste plaine sensiblement horizontale, parsemée de petites éminences, sur lesquelles on a construit les villages, pour les mettre à l'abri des inondations du Nil. Au moment de la grande chaleur du jour, ces villages paraissaient de loin comme au milieu d'un lac, dans les eaux fantastiques duquel on voyait les images renversées des maisons et des arbres. Les contours de ces images étaient un peu incertains, présentant souvent des mouvements ondulatoires, comme s'ils étaient réfléchis dans une eau agitée. A mesure qu'on s'approchait, ce prétendu lac semblait fuir, l'apparence disparaissait, et les soldats, épuisés de fatigue et accablés par la soif et la chaleur, éprouvaient une déception d'autant plus cruelle que l'illusion avait été plus complète. Ce même phénoméne se produit aussi dans nos climats, et plus fréquemment qu'on ne le croit généralement.

1956. Explication du mirage. Voici comment Monge explique le mirage. Supposons une plaine de sable à peu près horizontale, frappée par les rayons du soleil. Le sable s'échauffera rapidement, pendant que l'air traversé par les rayons solaires ne leur empruntera pas sensiblement de chaleur, à cause de son pouvoir diathermane. Mais la couche d'air qui touche le sable, en recevra de la chaleur par contact et se dilatera. Elle tendra alors à s'élever ; mais comme la couche dilatée présente la même tendance dans une grande étendue, il ne se formera pas de courants ascendants, et l'air chaud ne pourra que se mêler plus ou moins complètement aux couches immédiatement au-dessus. Celles-ci tendront, au contraire, à descendro, de manière à donner naissance à de petits courants contraires formés d'air inégalement dilaté, et

c'est ce qui fait que les objets que l'on voit à travers ces couches, paraissent agités. Comme ces mêmes effets se reproduisent continuellement, il y aura toujours près du sol des couches plus chaudes et plus dilatées que celles qui sont au-dessus, lesquelles mêlées avec de l'air chaud qu'elles ont reçu, seront aussi plus chaudes que celles qui leur sont superposées; et ainsi de suite jusqu'à une certaine hauteur. Vers le milieu de la journée, la densité de l'air ira donc en augmentant à partir du sol jusqu'à une certaine hauteur, après laquelle on trouvera la distribution ordinaire des couches de l'air. Soit *a* (*fig.* 1471) un point d'un objet quelconque, et *o* la position de l'observateur. Un rayon *ao* cheminant à peu près en ligne droite dans une même couche d'air, fera voir le point *a*; mais en même temps un rayon *ac*, dirigé obliquement de haut en bas, s'écartera de plus en plus de la verticale, en passant

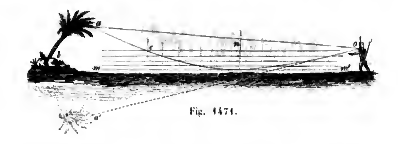


Fig. 1471.

successivement dans des couches de moins en moins réfringentes, et finira par rencontrer la surface de séparation *mm'* de deux d'entre elles, en faisant avec la normale *n* un angle égal à l'angle limite. Ce rayon éprouvera alors la réflexion totale, se relèvera en traversant des couches de plus en plus denses, et viendra enfin en *o* dans l'œil de l'observateur, qui verra en *a'* une image du point *a*. Il en sera de même des autres points de l'objet. Comme les rayons venant du ciel se réfléchissent de la même manière, ils forment une image brillante en forme de nappe horizontale, dont l'éclat empêche de distinguer le sol, et qui ressemble à un lac dans lequel se réfléchirait l'image de l'objet *ab*.

Comme l'angle limite est ici nécessairement très grand, puisque son sinus est égal à $1 : n$, et que *n*, indice relatif de deux couches d'air consécutives, ne peut être que très petit, le rayon *ac* doit être très oblique; ce qui exige que l'observateur soit très éloigné, et l'objet peu élevé au-dessus du sol. C'est pour cela que la nappe d'eau apparente ne se voit que dans les pays de plaine, les rayons venant du ciel ne pouvant partir de très bas, que s'il n'y a pas de montagnes à l'horizon. Celles-ci ne pourraient envoyer que des rayons faibles, au milieu desquels l'image de l'objet ne pourrait pas se détacher, par une teinte plus sombre. On voit aussi qu'il faut que l'air soit calme, et que le phénomène ne doit se montrer qu'après une certaine heure.

MM. Biot et Mathieu ont observé fréquemment le phénomène du mirage, à

Dunkerque, sur une plaine sablonneuse qui s'étend au bord de la mer au pied du fort de Risban. M. Biot a prouvé que les diverses courbes formées par les rayons qui vont dans l'œil, se coupent deux à deux dans la branche qui est du côté de l'objet, de manière à former une caustique ou *trajectoire limite* au-dessous de laquelle aucun objet ne peut être aperçu[1]. C'est à partir de cette courbe limite que se fait le renversement; de manière qu'un homme qui s'éloignerait de l'observateur, formerait, avec son image, les apparences représentées dans la *fig.* 1472. L'apparence observée dépend donc de la position de l'œil. M. Gorsse s'en est assuré, pendant qu'il examinait un très beau mirage dans la plaine de la Crau, près des Bouches-du-Rhône, où ce phénomène est fréquent : étant monté sur la margelle d'un puits, il vit entièrement une cabane, qui d'abord lui paraissait en partie plongée dans l'eau, et quand il se baissait, il la voyait s'enfoncer dans la nappe liquide apparente.

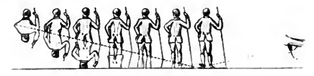


Fig. 1472.

Vérifications expérimentales. — Pour confirmer la théorie de Monge, on fait diverses expériences dans lesquelles on produit le mirage sur une petite échelle. Si l'on chauffe fortement et uniformément une caisse en tôle, soit en l'exposant au soleil, soit en la remplissant de charbons ardents, on peut, en plaçant l'œil très près de la surface, voir les images renversées de petits objets placés sur le bord opposé. — Un mur fortement échauffé par le soleil présente le même phénomène. M. Bigourdan a constaté que le soubassement de la Bourse de Paris, les murs des fortifications de cette même ville, manifestent le phénomène d'une manière remarquable, quand on place l'œil assez près de la surface verticale échauffée, et qu'il se trouve des objets à une petite distance de cette surface. Sur un terrain uni, comme une route, on peut aussi, en plaçant l'œil près du sol, voir l'image de pierres, de brins d'herbe, quand l'air est bien calme.

Wollaston, qui a trouvé de son côté, à la même époque que Monge, l'explication du mirage, montrait par l'expérience suivante l'influence du décroissement continu de la densité des couches du milieu : on superpose avec précaution dans un vase de verre, deux liquides capables de se combiner, comme l'alcool sur l'eau, l'eau sur l'acide sulfurique ou le sirop de sucre ; les deux liquides se mélangent peu à peu à la surface de séparation, de manière que le passage de la densité de l'eau à celle de l'autre liquide se fait graduellement. On

[1] *Mémoires de l'Institut*, Académie des Sciences, pour 1809.

regarde ensuite des lettres, à travers la couche mixte, et l'on voit, du côté du liquide le moins réfringent, leur image renversée.

1957. Mirage en mer. — Le mirage se produit sur la mer, quand l'air plus froid que l'eau, se trouve dans un calme parfait. On voit alors les rivages, les navires éloignés, présenter leur image renversée, et souvent presque aussi nette que les objets eux-mêmes. La partie inférieure des images du soleil, dans la figure 1470, est due à un effet de mirage sur mer. Monge a facilement étendu sa théorie, au cas du mirage en mer; les couches d'air en contact avec les eaux étant moins réfringentes que celles qui les recouvrent, parce qu'elles sont dilatées par le contact de l'eau plus chaude. On conçoit que le mirage en mer puisse avoir lieu à des heures très différentes; c'est, en effet, ce qui a lieu, et nous en avons observé un cas bien caractérisé, au mois d'octobre, vers 6^h du matin, à l'embouchure de la Tamise. Dans les régions polaires même, sur un sol glacé ou sur la mer, le mirage se produit assez fréquemment, quand le soleil se montre avec quelque éclat, et échauffe la surface de la mer ou celle du sol. Scoresby a été témoin, dans les mers polaires, de nombreux effets de mirages dont plusieurs très bizarres que nous allons citer.

1958. Mirage inverse, latéral. — Le mirage fait voir le plus souvent l'image au-dessous de l'objet; mais il peut arriver, quoique beaucoup plus rarement et principalement sur la mer, que l'image se forme au-dessus de l'objet, auquel cas on a le *mirage inverse* ou *renversé*. M. Vince, de sa maison de Ramsgate, vit avec un télescope, en regardant du côté de Douvres, un navire qui se trouvait à l'horizon, reproduit en l'air et renversé, de manière que les extrémités des mâts de l'image étaient en contact avec les extrémités de ceux du navire. On a observé des phénomènes analogues dans les mers du Groënland : un jour, le fils de Scoresby ayant été séparé par une tempête, du navire *la Fama*, baleinier monté par son père, aperçut dans les airs l'image renversée d'un navire, assez nette pour qu'il pût reconnaître *la Fama*, qui était très éloignée et entièrement cachée par la courbure de la mer. Scoresby a vu aussi plusieurs fois, en l'air, deux images du même vaisseau, l'une au-dessus de l'autre et renversées. Une fois, l'image la plus élevée était droite.

MM. Biot et Arago, étant en Espagne, dans le royaume de Valence, sur la montagne de Desierto de las Palmas, à 725^m au-dessus de la mer, observaient une lumière placée à une distance de 161 kilomètres et à 420^m de hauteur sur la montagne de Campwey, dans l'île d'Yviza. Ils virent plusieurs fois, indépendamment de la lumière elle-même, une, deux, trois images de cette lumière ou davantage, placées sur la même verticale, et se formant et disparaissant dans un ordre quelconque. Le lendemain matin, la mer était couverte de brouillards précipités pendant la nuit, ce qui indiquait combien l'air avait été humide pendant l'apparition des images.

Pour que le mirage renversé se produise, il faut qu'il y ait à une certaine hauteur des couches d'air sensiblement horizontales, allant en diminuant de densité de bas en haut assez rapidement pour que les rayons lumineux soient

infléchis d'une manière prononcée. Ce n'est donc que dans des conditions atmosphériques exceptionnelles qu'il peut se produire.

Mirage latéral. — Il peut arriver près des côtes, ou dans les pays de montagnes, que l'air soit séparé jusqu'à une certaine hauteur, par un plan à peu près vertical, en deux parties, l'une échauffée par le soleil, l'autre dans l'ombre du rivage ou de quelque colline ; il peut se faire encore qu'une partie de l'air ait reçu de la chaleur par contact, du flanc d'une montagne qu'elle recouvre. On conçoit que le passage de la partie échauffée à la partie plus froide ne se fera pas brusquement, et que l'air sera, dans une certaine étendue, partagé en couches à peu près verticales, et allant en décroissant de densité de la partie froide à la partie chaude. Si donc un observateur est placé dans le prolongement des couches de passage, il pourra voir, dans la partie chaude, l'image symétrique des objets situés dans la partie froide, à une grande distance du lieu qu'il occupe, comme s'il y avait un miroir vertical dans les couches de passage. Cette sorte de mirage se nomme *mirage latéral* ; il est beaucoup plus rare que les autres, et dure beaucoup moins.

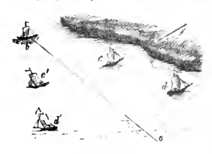


Fig. 1473.

MM. Soret et Jurine en ont observé un cas remarquable, sur le lac de Genève, près de la côte de Belle-Rive. Les observateurs regardaient au télescope, dans la direction *ob* (*fig.* 1473), une barque *b* située à 8 kilomètres, et qui s'avançait de leur côté. La barque prenant successivement les positions *c* et *d*, ils virent des images *c'* et *d'* parfaitement nettes, et même visibles à l'œil nu quand les voiles étaient éclairées par le soleil. L'air situé à gauche de la ligne *ob* recevait directement les rayons solaires dans la direction *f*, tandis que l'air situé à droite de cette ligne était resté dans l'ombre une partie de la matinée, et il devait y avoir, dans la direction *ob*, une surface à peu près verticale s'élevant à une certaine hauteur, et séparant l'air chaud de l'air froid.

On explique par le mirage, le phénomène de la *fata Morgana* propre au détroit de Messine. Quand le soleil est à 45° environ de hauteur, en regardant la mer, des collines qui dominent Messine, on voit en l'air et à une grande distance, des pilastres, des arcades, des châteaux, des navires, plus ou moins déformés, droits, renversés, inclinés, et changeant de position et d'aspect d'un instant à l'autre. Ce phénomène, dont la magnificence paraît avoir été beaucoup exagérée par les voyageurs, se voit aussi de Naples, de Reggio, et de plusieurs autres points de la côte de Sicile. On peut l'expliquer par la déviation des rayons lumineux partant d'objets réels, et traversant des masses d'air de température différente juxta-posées accidentellement dans des positions très diverses, et produisant l'effet de miroirs placés dans différentes directions.

La mobilité des images vient de ce que ces masses d'air se mélangent peu à peu et se déplacent en obéissant aux lois de l'hydrostatique. Brydone, qui a été témoin du phénomène, en 1770, remarque qu'il se produit après que l'air, fortement échauffé, a été agité par des vents violents qui l'ont ensuite abandonné dans un calme plat. On conçoit que les masses d'air très inégalement échauffées, à cause de la configuration des côtes du détroit, puissent être juxta-posées sans se mêler intimement, et donner lieu aux effets de réfraction les plus variés.

1059. Déplacements. — Suspensions. — Les objets terrestres placés près de l'horizon peuvent être, dans certaines circonstances, déplacés, quelquefois latéralement près des montagnes, mais le plus souvent dans le sens vertical, auquel cas ils paraissent plus ou moins élevés au-dessus de leur position réelle. Quelquefois, l'objet se voit double, certains rayons arrivant à l'œil sans avoir été sensiblement déviés, tandis que d'autres décrivent à travers des couches de densité croissante, une courbe assez prononcée pour que la tangente au point d'arrivée fasse un angle sensible avec le rayon direct. Ces phénomènes ont été souvent désignés sous le nom de mirage, mais ils se distinguent du mirage proprement dit, en ce que l'image n'est pas renversée ; ce qui indique l'absence de réflexion. Citons quelques exemples.

En 1858, M. Parés, étant à Aigues-Mortes, aperçut un soir des villages et des arbres, au-dessus de dunes qui les cachent ordinairement. Le Dr Vince, étant à Ramsgate, à 24 mètres au-dessus de la mer, vit, le 6 août, 1806, à 7 heures du soir, le château de Douvres très distinctement jusqu'à sa base, comme s'il eût été transporté sur les collines qui le cachent habituellement presque totalement. Douvres est à 20 kilomètres de Ramsgate, et un tiers de cette distance du côté de Ramsgate est occupé par la mer. — M. de Bréauté aperçut un jour, de Dieppe, les côtes d'Angleterre, quoiqu'elles soient cachées par la courbure de la mer. On a vu quelquefois, de la rive anglaise, les côtes de Calais et de Boulogne, singulièrement rapprochées. Les marins ont été longtemps intrigués par l'apparition fantastique d'une île entre l'île d'Aland et la côte suédoise, qui disparaissait quand on voulait en approcher. L'illusion était produite par un écueil situé à une petite profondeur, et qui paraissait élevé au-dessus de la mer, par la courbure des rayons lumineux dans l'atmosphère.

M. Andraud vit, en 1852, d'une distance de 40 kilomètres, le clocher de Strasbourg illuminé un jour de fête publique. L'image d'une grosseur colossale, paraissait n'être qu'à 2 kilomètres, et était assez nette pour qu'on pût distinguer les couleurs des différentes parties de l'illumination. — M. Blondat a vu, d'une maison de la rue de Fleurus, à Paris, le dôme de la Sorbonne et les toits des maisons voisines à une certaine hauteur dans l'air, en même temps qu'il voyait les objets réels. La distance verticale de l'image *suspendue*, au dôme réel, était égale à deux fois la hauteur de ce dernier [1]. Ce phénomène,

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 162 ; et XLI, p. 87.

désigné sous le nom de *suspension*, a été observé dans bien d'autres cas ; on a vu des villes reproduites ainsi dans les airs, d'une manière assez distincte pour qu'on pût en reconnaître les principaux édifices. Les exemples d'apparition de villes aériennes, d'armées et même de batailles au milieu des airs, que l'on trouve dans les récits du moyen-âge, s'expliquent par des effets de *suspension*. En voici un cas assez récent : en septembre 1835, on vit plusieurs jours de suite, en Angleterre, vers 5 heures du soir, des corps de cavalerie défiler dans les airs au milieu d'un ciel qui semblait couvert de vapeurs assez épaisses. On distinguait parfaitement le cavalier et son cheval, et même l'allure de ce dernier[1].

§ 2. — RÉFRACTION DANS LES MILIEUX TERMINÉS PAR DES SURFACES PLANES.

1960. Des caustiques par réfraction. — Énonçons d'abord le principe général suivant établi par Malus, semblable à celui qui avait été antérieurement découvert relativement à la réflexion. Quand des rayons émanant d'un point lumineux tombent sur la surface plane ou courbe qui sépare deux milieux transparents, il existe toujours sur cette surface deux systèmes de courbes, dites *lignes de réfraction*, telles que tous les rayons réfractés sur une même courbe forment une surface développable, en se coupant deux à deux. L'ensemble des *arêtes de rebroussement* des surfaces développables correspondant à un même système de courbes, forme une surface *caustique de réfraction* ou *diacaustique*, et les intersections des deux *diacaustiques* se nomment *lignes focales*, ou *foyers* quand ce sont des points.

Cas des surfaces de révolution. — Dans le cas d'une surface de révolution sur l'axe de laquelle se trouve le point lumineux, l'un des systèmes de courbes est formé par les circonférences perpendiculaires à l'axe, chaque surface développable est un cône, et la caustique se réduit à une ligne droite qui est une portion de l'axe. L'autre système de courbes est formé par les méridiennes ; les surfaces développables sont des plans, et l'arête de rebroussement formée par la rencontre deux à deux des rayons réfractés sur une même ligne de réfraction, est une courbe plane. En faisant tourner cette courbe autour de l'axe, on obtient la seconde surface caustique. Les points où elle rencontre l'axe sont alors des foyers.

I. Marche des rayons entrant par une surface plane dans un milieu indéfini.

1961. Ce que nous venons de dire relativement à deux milieux séparés par une surface de révolution, s'applique au cas où cette surface est plane.

[1] *Traité de météorologie*, par J.-G. Garnier, p. 404.

L'axe de révolution est alors représenté par la perpendiculaire abaissée du point lumineux sur la surface, et les lignes de réfraction perpendiculaires à l'axe, par des circonférences ayant leur centre au pied de cette perpendiculaire. Le second système de lignes est formé par des droites passant par ce pied. Il est évident que les rayons réfractés sur une de ces droites seront, en entrant dans un milieu *plus réfringent*, moins divergents que les rayons incidents ; mais ils seront toujours divergents, parce que l'angle de réfraction augmente en même temps que l'angle d'incidence (1948). Ces rayons ne se rencontreront pas en un même point, comme dans le cas de la réflexion, et ils formeront une *courbe caustique*, en se rencontrant deux à deux.

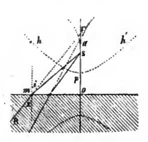


Fig. 1474.

1962. De la forme de la caustique de révolution. — Pour démontrer que les rayons réfractés dans un même plan ne coupent pas l'axe au même point, considérons un rayon incident, *sm* (*fig.* 1474), et soit *m*R le rayon réfracté; appelons p la distance so; i et r, les angles d'incidence et de réfraction ; et n l'indice de réfraction relatif des deux milieux, et supposons que les rayons entrent dans le plus réfringent des deux. Nous allons chercher la distance $ro=p'$, de la surface au point r où le rayon réfracté prolongé coupe l'axe. On a d'abord dans le triangle rectangle rmo, $\overline{ro}^2=p'^2=\overline{mr}^2-\overline{mo}^2$, et il faut déterminer mr et mo. Or, le triangle rmo donne $\overline{mr}=\frac{\overline{mo}}{\sin r}=\frac{n\,.\,\overline{mo}}{\sin i}$. Substituant dans la valeur de p'^2, il vient $p'^2=\overline{mo}^2\left(\frac{n^2-\sin^2 i}{\sin^2 i}\right)$. La valeur de mo est donnée par le triangle mso, dans lequel on a

$$p^2=\overline{so}^2=\overline{sm}^2-\overline{mo}^2=\frac{\overline{mo}^2}{\sin^2 i}-\overline{mo}^2,\quad \text{d'où}\quad \overline{mo}^2=\frac{p^2\sin^2 i}{1-\sin^2 i}.$$

Portant cette valeur dans celle de p', il vient enfin

$$p'=\pm p\sqrt{\frac{n^2-\sin^2 i}{1-\sin^2 i}}.$$

Comme les rayons sont toujours divergents, le point r est du même côté que s, et le foyer a est virtuel. Si donc nous convenons de prendre p' positif du côté où se formerait un foyer réel, c'est-à-dire du côté opposé à p, nous devrons adopter la valeur négative du radical, l'autre valeur ne convenant pas à la solution physique de la question. Comme n est plus grand que l'unité, et $\sin i$ au plus égal à 1, p' est toujours réel. Le numérateur étant plus grand que le dénominateur, quand $\sin^2 i$ augmentera, la valeur du rapport sous radical

augmentera aussi, et par conséquent, la valeur absolue de p'. Nous voyons donc que les rayons réfractés coupent la normale *so*, à des distances d'autant plus grandes du point *o*, que les rayons incidents s'écartent davantage de cette normale. Les prolongements des rayons réfractés se coupent donc deux à deux, de manière à former une caustique, dont le sommet s'obtient en faisant *i* égal à zéro, ce qui donne $p'=ao=p\times n$. La distance du sommet au point *o* est donc proportionnelle à l'indice *n* et à la distance *p*. Pour $i=90°$, on a $p'=-\infty$; la courbe, s'étend donc à l'infini. On démontre par l'analyse mathématique que cette courbe est la développée d'une branche d'hyperbole *hh'*, dont le centre est en *o*, et l'un des foyers en *s*. Les valeurs positives de p' correspondent à la développée de la seconde branche de cette hyperbole, mais elles ne répondent pas au problème physique.

Si le milieu dans lequel entrent les rayons est le moins réfringent (*fig.* 1475), il faut supposer que *n* est moindre que l'unité, et alors on voit que la valeur absolue de p' diminue quand *i* augmente ; sa plus grande valeur, correspondant à $i=0$, est $p'=-np$. On voit donc que le sommet *a* de la diacaustique est tourné du côté opposé à la surface de séparation. Il faut de plus, pour que la valeur de p' soit réelle, que l'on ait $\sin i < n$. Or, l'angle dont le *sinus* est égal à *n*, n'est autre que l'angle limite, puisque l'angle d'incidence étant pris ici dans le milieu le plus réfringent, *n* est plus petit que l'unité. Si l'on fait $\sin\ i=n$, on a $p'=0$. La courbe rencontre donc la surface de séparation, quand le rayon incident fait avec la normale *so*, un angle dont le *sinus* est égal à *n*, et elle est tangente à cette surface, puisque, pour $\sin i=n$, le rayon réfracté est couché dans son plan. On démontre par l'analyse que la génératrice de la diacaustique est la développée d'une ellipse dont le centre est en *o*, et l'un des foyers en *s*.

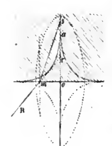


Fig. 1475.

Si les rayons incidents sont parallèles, on a $p=\infty$, et il vient $p'=\pm\infty$, quel que soit *i*; les rayons réfractés sont donc aussi parallèles.

Si l'on suppose $n=-1$, on a le cas des rayons *réfléchis*, et l'on trouve $p'=-p$, quel que soit *i*. Tous les rayons réfléchis se rencontrent donc en un seul foyer virtuel, symétrique du point lumineux.

Si l'on considère les rayons qui ne s'écartent que très peu de l'axe, on voit qu'ils forment un foyer virtuel *a* (*fig.* 1474 et 1475) à une distance de la surface, égale à $p\times n$.

1963. Conséquences. — Quand on regarde une ligne droite horizontale placée sous l'eau, elle paraît concave, plus rapprochée et plus grande qu'elle n'est réellement. Pour expliquer ce résultat, considérons la droite *ab* (*fig.* 1476) placée au fond de l'eau ; un point *a* envoie au dehors des rayons qui, prolongés, forment une caustique de révolution autour de la normale *ap* passant par ce point, et dont le sommet est situé entre les points *a* et *p* (1962). Pour obtenir

les pinceaux réfractés qui, partant de a, entrent dans l'œil o, il faut mener, des bords de la pupille, des rayons tangents à cette caustique; on obtient ainsi le pinceau brisé ano, qui fait voir le point a, en a'. De même, le point b se verra en b', le point c en c'.....; et en joignant les points a', c', b'.... on aura l'image de la droite ab. Cette image sera concave, les points de contact a', b'... étant d'autant plus éloignés des sommets des caustiques, que les rayons incidents sont plus obliques. La position de l'image dépendant de celle de l'œil, on pourra voir deux images, avec les deux yeux. On voit que l'image a' b' est rapprochée de la surface, et qu'elle est amplifiée, le diamètre angulaire $a'ob'$ étant plus grand que aob, qui serait ce diamètre s'il n'y avait pas d'eau. Il est facile de voir enfin que le grossissement augmente quand l'œil se rapproche. Cela nous explique pourquoi les poissons paraissent dans l'eau un peu plus gros qu'ils ne sont, et pourquoi le fond plat d'un bassin paraît concave. La courbe a' c' b' formée par l'image de la ligne droite acb, a reçu des géomètres le nom de *courbe réfractoire*. On démontre par l'analyse mathématique que c'est une *conchoïde elliptique*.

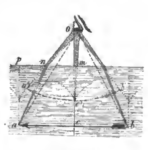


Fig. 1476.

II. Réfraction des rayons traversant un milieu terminé par des plans. — Prismes.

1964. Quand un rayon traverse un milieu de part en part, il y a à distinguer, indépendamment des rayons incident et réfracté, le *rayon émergent*, c'est-à-dire le rayon à sa sortie du milieu traversé. L'angle du rayon émergent avec la normale, se nomme l'*angle d'émergence*. Le point par lequel le rayon pénètre dans le milieu, est le point d'*immergence*, et celui par lequel il sort, le point d'*émergence*.

1965. MARCHE DES RAYONS TRAVERSANT UN MILIEU TERMINÉ PAR DEUX PLANS PARALLÈLES. — Dans ce cas, les rayons ne sont pas déviés; ils éprouvent seulement un déplacement latéral, qui dépend de l'épaisseur et de la nature du milieu, et de l'angle d'incidence. En effet, soit un rayon incident lI (*fig.* 1477). Il entre en faisant avec la normale un angle r différent de i; mais comme les normales en I et en E sont parallèles, l'angle intérieur fait avec la normale en E, est égal à r. L'angle d'émergence e sera donc égal à i, car on a $\sin i = n \sin r$, et $\sin e = n \sin r$. Pour vérifier ce résultat par l'expérience, on regarde un point éloigné, au moyen d'une lunette à réticule, à travers une lame de verre

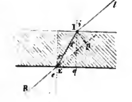


Fig. 1477.

épaisse placée obliquement ; on reconnaît que le point ne paraît pas se déplacer, quand on fait tourner la lame autour du rayon émergent qui entre dans l'axe de la lunette.

Déplacement latéral du rayon. — L'expérience montre aussi que le rayon est déplacé parallèlement à lui-même ; car si l'on regarde un trait fin, en partie directement, et en partie à travers une lame de verre épaisse et oblique, on reconnaît que les deux parties du trait ne sont pas sur le prolongement l'une de l'autre.

Le déplacement latéral est facile à calculer ; car il est égal à la longueur Ip perpendiculaire à RE prolongé, et le triangle EIp donne

$$\overline{\mathrm{I}p}=\overline{\mathrm{IE}}\sin \overline{\mathrm{IE}p}=\overline{\mathrm{IE}}\sin(i-r)=\overline{\mathrm{IE}}(\sin i\cos r-\cos i\sin r).$$

Remplacant $\sin r$ et $\cos r$ par leurs valeurs en fonction de $\sin i$, tirées de la relation $\sin i = n \sin r$, il vient $\overline{\mathrm{I}p}=\frac{\sin i}{n}(\sqrt{n^2-\sin^2 i}-\cos i)$. Pour évaluer IE, désignons par e l'épaisseur Iq. Le triangle IEq donne $\overline{\mathrm{IE}}=\frac{e}{\cos r}=\frac{ne}{\sqrt{n^2-\sin^2 i}}$. Substituant, il vient enfin

$$\mathrm{I}p=e\sin i\left(1-\sqrt{\frac{1-\sin^2 i}{n^2-\sin^2 i}}\right).$$

formule qui montre que le déplacement est proportionnel à l'épaisseur et donne Ip=0 pour i=0, et Ip=e, pour i=90°. Quand n est moindre que 1, c'est-à-dire quand le milieu traversé est moins réfringent que le milieu environnant, la valeur de Ip devient imaginaire, si l'on a $\sin i > n$; en effet, nous savons que $\sin i = n$ correspond alors à l'angle limite.

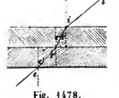


Fig. 1478.

1966. Cas de plusieurs lames à faces parallèles. — Si le rayon traverse plusieurs lames à faces parallèles ne se touchant pas, il est facile de voir que le rayon émergent est encore parallèle au rayon incident, même si les lames ne sont pas parallèles entre elles, et que le déplacement latéral est égal à la somme algébrique des déplacement produits par chaque lame.

Relation entre l'indice de réfraction relatif et les indices absolus. — L'expérience montre que les résultats sont les mêmes quand les lames sont appliquées les unes sur les autres, sans interruption et sans interposition d'aucune espèce de substance ; d'où l'on doit conclure que *l'indice de réfraction relatif de deux substances contiguës est égal au rapport de leurs indices absolus.* En effet, soit i, r, r', e (*fig.* 1478) les angles faits avec la normale, par le rayon qui traverse deux lames superposées. On aura, en appelant n, n' les indices absolus des deux milieux, $\sin i = n \sin r$; $\sin e = n' \sin r'$; et

comme l'expérience montre que les rayons émergent et incident sont parallèles, on a $e=i$, et, par conséquent, $n \sin r = n' \sin r'$; d'où $\frac{\sin r'}{\sin r} = \frac{n}{n'}$. Or, le premier membre n'est autre chose que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction d'un rayon passant de l'une des lames dans l'autre ; le rapport $n : n'$ des indices absolus des deux substances représente donc leur *indice relatif*, en mettant en numérateur le plus grand indice n qui correspond à l'angle le plus petit r. Nous verrons que les théories des ondulations et de l'émission conduisent à ce résultat.

1967. Réflexions multiples dans les miroirs de verre étamé. — Nous avons dit (1902) que les miroirs de glace donnent plusieurs images. Pour nous rendre compte de ce résultat, considérons un rayon incident am (*fig.* 1479) tombant sur la glace LL′ étamée en dessous. Ce rayon se réfléchit d'abord en n sur la première surface, en donnant une image a' symétrique du point lumineux a; mais il ne se réfléchit qu'en faible proportion ; la plus grande partie pénètre dans la lame de verre et se réfléchit en dedans au point B, sur la surface étamée. Le rayon réfléchi, arrivé en N, émerge en partie, et prend la direction NR parallèle à nr, car tout est symétrique par rapport à la normale Bp. Ce rayon est dans le même cas que s'il se réfléchissait au point de rencontre o des rayons an et NR, sur une surface oc parallèle à Ln; l'image formée par les rayons réfléchis en B est donc en A, point symétrique de a par rapport à la surface c. Le rayon réfléchi BN n'émerge pas entièrement, une partie se réfléchit en dedans suivant Nb', et vient émerger en partie en n', en donnant un rayon $n'r'$ qui est dans le même cas que s'il était réfléchi en o', et provenait d'un rayon incident a_1N partant du point a_1, symétrique du point A par rapport à la surface Ln. Il y aura donc une troisième image a'' symétrique de a_1 par rapport à co; et ainsi de suite. — L'expérience se fait facilement avec une bougie dont on cache la flamme par un écran ne laissant passer la lumière que par une fente étroite ; les images de la fente paraissent les unes derrière les autres, et on peut en distinguer jusqu'à six. La plus brillante est la seconde, A; les suivantes n'étant formées que par des rayons dont une partie seulement a été réfléchie en dedans à chaque émergence, sont de plus en plus faibles. La première est à peu près de même éclat que la troisième. Si la lame de verre a une teinte bleuâtre, la première image seule ne présente pas cette

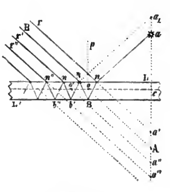


Fig. 1479.

teinte, comme on devait s'y attendre. Les images sont d'autant plus séparées les unes des autres, qu'on les observe plus obliquement ; on n'en distingue qu'une seule, quand on regarde suivant la normale qui passe par la flamme.

Quand on fait l'expérience avec les glaces coulées les mieux polies, on remarque des anomalies singulières, suivant le point d'incidence des rayons qui vont à l'œil, surtout quand la flamme est très éloignée. Tantôt les images se montrent très distantes les unes des autres, tantôt superposées, ou même dans un ordre renversé. Il suffit quelquefois de déplacer l'œil suivant la verticale, de manière à changer le point d'incidence sans modifier les angles d'incidence, pour obtenir ces diverses anomalies. Elles s'expliquent en considérant que le verre coulé en glace ne peut être homogène ; ce qui fait que les rayons y éprouvent en certains points, des déviations irrégulières donnant lieu aux effets que nous venons de signaler.



Fig. 1480.

1968. DES PRISMES. Quand un corps transparent est terminé par deux surfaces formant un angle, on lui donne le nom de *prisme*, parce que ce corps, devant être limité du côté opposé à l'arête d'intersection, on le termine ordinairement par une surface plane parallèle à cette arête, ce qui lui donne la forme d'un prisme triangulaire. En optique, quand on parle d'un prisme, on entend toujours un prisme triangulaire, à moins qu'on n'avertisse du contraire. On nomme *arête* ou *sommet* du prisme, l'intersection des deux faces que traverse le rayon lumineux ; la troisième face, qui ne sert pas et qui pourrait être dépolie ou noircie, se nomme la *base* du prisme. On voit que ce mot n'a pas ici la même signification qu'en géométrie. La *fig.* 1480 représente un prisme P monté sur un pied ; il peut tourner sur lui-même et s'incliner plus ou moins, de manière à se prêter facilement aux expériences.

Effet du prisme sur la direction des rayons lumineux. — Un prisme a pour effet de dévier du côté de sa base, les rayons qui le traversent. En effet, soit le rayon incident *si* (*fig.* 1481). Ce rayon pénètre dans le prisme, suivant *ii'*, en se rapprochant de la normale, et vient frapper la seconde face en *i'* ; là, il éprouve en sortant une nouvelle réfraction, dans laquelle il s'écarte de la normale ; de sorte que ces deux déviations successives le rabattent vers la base BC.

Ce résultat ne paraît pas aussi évident quand l'angle A du prisme étant petit, le rayon réfracté *ii'* (*fig.* 1482) se trouve au-dessous de la normale *ni'* à la seconde face AC. Alors le rayon émergent se relève en s'écartant de la normale en *i'*, et il faut prouver qu'il se relève moins que ne s'est abaissé le rayon réfracté *ii'*. En effet, si la face AC était parallèle à AB et dirigée suivant A'B', le rayon émergent serait *i'e*, parallèle au rayon incident *di* (1965). Si maintenant nous ramenons la face A'B', en AC, la normale tournera d'une quantité égale à l'angle A, et l'angle que fait le rayon réfracté *ii'* avec la

normale, aura diminué de A. Si le rapport de l'angle d'émergence à l'angle que fait le rayon ii' avec la normale en i', ne changeait pas, le rayon émergent resterait dirigé suivant $i'e'$. Mais comme l'angle diminue plus rapidement dans le milieu le plus réfringent que dans le milieu le moins réfringent (1948), on voit que l'angle d'émergence diminuant plus que l'angle $n'i'n$, le rayon émergent s'abaissera au-dessous de $i'e'$.

La déviation par le prisme se vérifie par l'expérience en faisant passer un pinceau de rayons solaires à travers un prisme. On peut aussi regarder un point, à travers le prisme ; ce point paraît *relevé vers le sommet*, d'où l'on conclut que les rayons sont déviés vers la base. En effet, soit s le point (*fig.* 1483) ; le pinceau de rayons qui entre dans l'œil est *saco*, et le point s paraît relevé en s' sur le prolongement de la partie *co*.

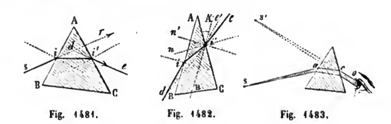


Fig. 1481. Fig. 1482. Fig. 1483.

Nous supposons, dans ce qui précède, que le prisme est plongé dans un milieu, comme l'air, moins réfringent que sa substance. Mais si le milieu environnant était plus réfringent que le prisme, comme cela aurait lieu si l'on faisait un prisme creux avec des lames de verre, et qu'on le plongeât dans l'eau après l'avoir rempli d'air, les résultats seraient inverses ; c'est-à-dire que le rayon serait dévié *vers le sommet*, comme on peut le reconnaître par les mêmes raisonnements que ci-dessus.

1969. Limite des rayons qui peuvent émerger. — L'angle d'incidence restant constant, l'angle d'émergence augmente évidemment en même temps que l'angle du prisme. Il est facile de voir aussi que, le prisme restant le même, l'angle intérieur à la sortie augmente à mesure que le rayon incident se relève vers le sommet A. Si donc nous supposons le prisme indéfini du côté de sa base, l'angle intérieur finira toujours par devenir égal à l'*angle limite*. Nous allons calculer l'angle que fera alors le rayon incident avec la normale.

Soit $nis=x$ (*fig.* 1484) cet angle ; alors l'angle $i\theta n$ est égal à l'angle limite θ, et l'on a $\sin x=n \sin r$. Pour obtenir r en fonction de l'angle a et de l'indice de réfraction, remarquons que l'angle $io\theta$ des deux normales étant égal à a, le triangle $io\theta$ donne $\widehat{oi\theta}=r=\theta-a$, et l'équation devient $\sin x=n \sin(\theta-a)=n(\sin\theta \cos a - \cos\theta \sin a)$; et comme on a $\sin\theta=1:n$ (1949), d'où $\cos\theta=\sqrt{1-\sin^2\theta}=\frac{1}{n}\sqrt{n^2-1}$, il vient

$$\sin x = \cos a - \sin a \sqrt{n^2-1}.$$

$\sin x$ est pris positivement dans l'angle niA, et négativement dans nib.

Discussion. — Si a augmente, $\cos a$ diminue, et $\sin a$ augmente ; donc, $\sin x$ diminue, et par conséquent x, puisqu'il est moindre que 90°. Si l'on suppose $a=\theta$, on trouve $\sin x = 0$, en remplaçant $\sin a$ par $\sin \theta = 1 : n$, et $\cos a$ par $\cos \theta = \frac{1}{n}\sqrt{n^2-1}$. Donc, le rayon limite est la normale ni, et les rayons incidents compris dans l'angle nib peuvent seuls donner des rayons émergents. Ce résultat peut se voir directement, car le rayon si (*fig.* 1485) entre sans éprouver de déviation, et l'angle $ii'b$ des deux normales est égal à θ.

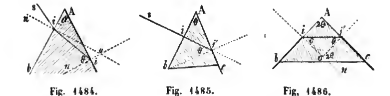


Fig. 1484. Fig. 1485. Fig, 1486.

Si l'on fait $A > \theta$, $\sin x$ devient négatif ; le rayon limite est donc compris dans l'angle nib (*fig.* 1484). Si enfin l'on fait $A = 2\theta$, la formule devient $\sin x = \cos 2\theta - \sin 2\theta\sqrt{n^2-1}$. Or, $\sin 2\theta = \sin\theta \cos\theta = \frac{2}{n^2}\sqrt{n^2-1}$, $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin\theta^2 = \frac{n^2-1}{n^2} - \frac{1}{n^2} = \frac{n^2-2}{n^2}$; d'où $\sin x = -1$. Le rayon limite fait donc un angle droit avec la normale, du côté nib ; il est donc couché en ib sur la face du prisme, et il n'y a que ce rayon qui puisse émerger. C'est ce qu'on peut voir directement, car l'angle A étant égal à 2θ (*fig.* 1486), on a $oii' + oi'i = i'on = 2\theta$; et les angles oii', $oi'i$ ne pouvant être plus grands que l'angle limite, chacun d'eux est égal à θ. Les rayons incident et émergent ne peuvent donc être que bi, et $i'c$.

Si l'on avait $A > 2\theta$, aucun rayon ne pourrait émerger, et si la base du prisme était noircie et s'il était placé transversalement dans l'ouverture d'un volet de manière à la fermer, il ne laisserait pénétrer aucun rayon de lumière. — Tous ces résultats peuvent se vérifier au moyen des prismes à angle variable que nous décrirons plus loin (1972). Dans le cas d'un prisme en verre, il suffit que l'angle soit de 90° pour qu'aucun rayon ne puisse émerger ; un prisme d'eau devrait avoir un angle de 96°.

1970. Cas où le plan d'incidence est oblique aux arêtes. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que le plan d'incidence était perpendiculaire aux arêtes du prisme, et que par conséquent, les rayons incident, réfracté et émergent, restaient dans le plan d'une section droite. Considérons maintenant le cas des rayons incidents de direction quelconque, et cherchons quels sont

ceux qui donneront des rayons émergents. Soit *Abd* (*fig.* 1487) la section droite qui passe par le point d'incidence, et *nlo* la normale à la face d'entrée. Décrivons autour de cette droite comme axe, un cône *clb* dont la génératrice fasse avec cet axe un angle *olb* égal à l'angle limite θ. Tous les rayons qui, entrant par la face Ac, pénétreront dans le prisme, seront contenus dans ce cône, l'angle de réfraction dans le milieu le plus réfringent ne pouvant jamais être plus grand que l'angle limite. Abaissons l*o*′ normale à A*o*, et construisons le cône *fle*, ayant aussi 2θ pour angle au sommet. Tout rayon réfracté entrant par le point I devra, pour émerger, être contenu dans ce dernier cône ; car, tout rayon pris en dehors ferait avec la normale, parallèle à l*o*′, un angle plus grand que l'angle limite. Il résulte de là que les rayons qui peuvent émerger, devant être contenus à la fois dans les deux cônes *clb*, *fle*, perceront la face A*b* dans la partie *ce* commune à ces cônes.

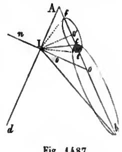


Fig. 1487.

Comme tout est symétrique par rapport à la section droite *Abd*, *ec* partage par la moitié cette partie commune, qui est d'autant plus grande que *ec* est plus grand. Pour évaluer *ec*, ou *cle*, remarquons que l'angle des deux normales, *o*′I*o*, étant égal à l'angle *a* du prisme, on a $o'\text{l}o = a = ol'e + clo - cle = 2\theta - cle$, d'où $cle = 2\theta - a$.

Si l'on a $a = \theta$, l'angle *o*′I*o* est aussi égal à θ, et les arêtes l*e* et l*c* des cônes se confondent avec les normales, qui font aussi entre elles l'angle θ. Parmi les rayons renfermés dans la section droite, *nlo* est alors le dernier qui émerge, puisqu'il fait avec la normale à A*b* un angle égal à θ ; ce que nous savions déjà. Si $a = 2\theta$, on a aussi $o'\text{l}o = 2\theta$; les deux cônes sont tangents suivant une arête, qui représente l'unique rayon qui puisse émerger. Ce rayon fait l'angle θ avec la normale à A*d* ; il provient donc d'un rayon incident couché sur A*d* dans la section droite. Si *a* est plus grand que 2θ, les cônes ne se rencontrent pas, et il n'y a plus de rayon émergent.

1071. Angle de déviation. — On nomme *angle de déviation*, l'angle *l′o*R (*fig.* 1488) que fait le rayon émergent avec le prolongement du rayon incident. Dans la figure 1482, c'est l'angle *ide*. On voit que la déviation représente la quantité angulaire dont a tourné le rayon incident pour prendre la direction du rayon émergent ; il est facile d'en trouver la valeur, D, en fonction des angles d'incidence, *i*, et d'émergence, *e*. Le triangle I*o*E (*fig.* 1488) donne $l'o\text{E} = \text{D} = o\text{IE} + o\text{EI} = i - r + e - r'$, en appelant r et r' les angles faits par le rayon réfracté IE avec les normales aux deux faces. Or, le triangle I*a*E donne $r + r' = \text{I}an = a$, en désignant par *a* l'angle du prisme ; on a donc, enfin

$$\text{D} = i + e - a.$$

Dans le cas de la *fig.* 1482, on aurait $\text{D} = i - e - a$.

Quand l'angle du prisme est très petit, et que le rayon incident passe à peu près perpendiculairement au plan bissecteur de cet angle, les angles faits avec les deux normales sont eux-mêmes très petits. On peut les remplacer par leur sinus, et l'on a alors i=sin i=n . sin r=nr, et e=nr'; d'où, $i+e=n\,(r+r')=na$. La valeur de D devient donc

$$D=(n-1)\,a.$$

formule fréquemment employée, qui montre que la déviation est sensiblement proportionnelle à l'angle du prisme.

1972. Prisme à angle variable. — Il est facile de voir que la déviation, pour une même incidence, augmente avec l'angle du prisme; car cet angle augmentant de α (*fig.* 1488), et la face AB venant en AB′, l'angle r' augmente de la même quantité, puisque l'on a $r+r'=a$, et que r ne varie pas; donc, l'angle d'émergence devra augmenter d'une quantité plus grande que α, pour que le rapport des *sinus* reste constant (1948). Ainsi donc la normale à la face AB se déplace aussi de α, ce qui tend à relever le rayon émergent R′, ce dernier conservera toujours une partie de l'abaissement qu'il doit à l'accroissement α; la déviation sera donc augmentée.

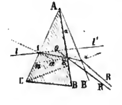


Fig. 1488.

Ce résultat se vérifie au moyen du prisme à angle variable (*fig.* 1489). Deux plaques parallèles *aa′*, *bb′* sont réunies par un fond horizontal *oo′* fixé au pied de l'instrument. Deux glaces *oc*, *o′c′* peuvent glisser à frottement entre les deux plaques, en tournant autour des charnières *o*,*o′*. Les surfaces intérieures des plaques *aa′*, *bb′*, et les bords des glaces sont dressées avec soin, de manière que l'intérieur de l'appareil peut contenir de l'eau, et former ainsi un prisme liquide dont on peut faire varier l'angle. Cet angle se mesure sur des divisions tracées aux extrémités de la plaque *bb′*, arrondies en arc de cercle. — On peut encore employer le système ABC (*fig.* 1490), imaginé par Boscovich : une échancrure cylindrique est pratiquée dans le prisme ABC parallèlement à ses arêtes, et contient un demi-cylindre *cod* de même substance que le prisme. Ce demi-cylindre peut tourner autour de son axe, de manière que la face *cd* forme successivement différents angles avec la face AC. Un rayon *ie*, en passant en *o*, n'éprouve pas de déviation, puisque

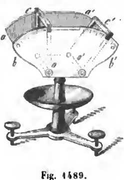


Fig. 1489.

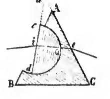


Fig. 1490

les deux milieux qui se suivent sont également réfringents ; il est donc dans le même cas que s'il traversait un prisme formé d'une seule pièce, et ayant un angle égal à *daC*.

1973. Minimum de déviation. — La déviation d'un rayon à travers un prisme prend une valeur *minimum* quand l'angle d'incidence est égal à l'angle d'émergence, ou, ce qui revient au même, quand le rayon réfracté dans le prisme est également incliné sur ses deux faces.

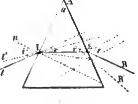


Fig. 1491.

Pour prouver d'abord qu'il existe toujours un angle d'incidence auquel correspond un angle d'émergence égal, considérons le rayon incident normal *nl* (*fig.* 1491) et écartons-le peu à peu du sommet A ; l'angle *r* que fait le rayon réfracté, avec la normale au point d'immergence, ira en augmentant à partir de 0°, tandis que l'angle *r'* que fait ce rayon avec la normale à la face d'émergence, ira en diminuant, puisque l'on a $r+r'=a$. Il arrivera donc un moment où ces deux angles seront égaux, et alors l'angle d'incidence sera égal à l'angle d'émergence.

Cela posé, soit *lI* et ER les rayons incident et émergent qui font des angles égaux avec la normale. Il est facile de voir que l'angle de déviation qu'ils font entre eux est *minimum*. En effet, supposons que le rayon incident vienne en *l'* I, la valeur de *r* diminuera, et *r'* augmentera de la même quantité ; *e* augmentera donc aussi et deviendra plus grand que *i*. Mais on a $\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{\sin e}{\sin r'}$; sin *e* et sin *r'* étant plus grands que sin *i* et sin *r*, il doit y avoir plus de différence entre sin *e* et sin *r'* qu'entre sin *i* et sin *r*, et, à plus forte raison, entre *e* et *r'* qu'entre *i* et *r*, puisque les arcs l'emportent d'autant plus sur leurs *sinus* qu'ils sont plus grands. Donc, *e* sera augmenté plus que *i* n'est diminué. La déviation, qui est égale à $i+e-a$ (1971) sera donc aussi augmentée. — Si le rayon incident venait au-dessous de *l* I, on verrait de même que l'accroissement de *i* l'emporterait sur la diminution de *e*, et il y aurait encore augmentation de la déviation. La valeur qui correspond à $i=e$ est donc bien un minimum.

1974. Trouver la condition pour qu'il y ait minimum. — On peut aborder la question autrement et se proposer de trouver la condition pour que la déviation soit minimum. M. E. Barry a donné pour cela une méthode élémentaire, qui a été un peu modifiée de la manière suivante. Nous avons d'abord

$$D=i+e-a,\quad r+r'=a\quad \sin i=n\sin r,\quad \sin e=n\sin r'.$$

Ajoutant les deux dernières égalités membre à membre, il vient

$$\sin i+\sin e=n(\sin r+\sin r'),$$

ou $$\sin\tfrac{1}{2}(i+e)\cos\tfrac{1}{2}(i-e)=n\sin\tfrac{1}{2}(r+r')\cos\tfrac{1}{2}(r-r')$$

Remplaçant $i+e$ et $r+r'$ par leurs valeurs ci-dessus, on trouve

$$\sin\frac{a+D}{2}=n\sin\frac{a}{2}\frac{\cos\frac{1}{2}(r-r')}{\cos\frac{1}{2}(i-e)}.$$

D sera minimum quand $\sin\frac{1}{2}(a+D)$ sera lui-même minimum, puisque $\frac{1}{2}(a+D)=\frac{1}{2}(i+e)$ est moindre que 90°. Il suffit donc de chercher la condition pour que $\frac{\cos\frac{1}{2}(r-r')}{\cos\frac{1}{2}(i-e)}$ soit minimum. Or, ce rapport est plus grand que 1 ; en effet, en supposant i plus grand que e, on a $i-r>e-r'$ (1948), d'où $i-e>r-r'$. Si i était moindre que e, on changerait les signes des arcs, ce qui ne modifierait pas celui des cosinus, et l'on arriverait au même résultat. Puisque l'on a $i-e>r-r'$, $\cos\frac{1}{2}(i-e)$ est *moindre* que $\cos\frac{1}{2}(r-r')$; le rapport des deux cosinus est donc plus grand que l'unité. Il atteindra donc sa valeur minimum quand il sera égal à 1, c'est-à-dire quand on aura $i=e$, et $r=r'$. On aura alors

$$\sin\frac{a+D}{2}=n\sin\frac{a}{2}$$

formule qui donne la déviation minimum ou fonction de l'indice de réfraction et de l'angle du prisme.

1975. Vérifications expérimentales. — Pour montrer l'existence du minimum de déviation, aprés avoir marqué le point où un pinceau de rayons solaires rencontre un écran vertical, on place un prisme dans le trajet de ce pinceau, et on le fait tourner peu à peu, toujours dans le même sens, autour d'un axe parallèle à ses arêtes. On voit le point de rencontre du faisceau dévié avec l'écran, se rapprocher peu à peu du point marqué, puis s'arrêter un instant, pour recommencer à s'en éloigner. La position du prisme pour laquelle la déviation est minimum se nomme *position newtonienne*, parce que c'est Newton qui a découvert le minimum de déviation.

Pour vérifier que, au moment où a lieu le minimum, les pinceaux incident et émergent sont également inclinés sur les deux faces du prisme, on peut employer le goniomètre de M. Babinet (1915). On fixe un prisme *isocèle* sur le support central, perpendiculairement au plan du cercle, de manière que la face opposée à l'arête formée par les faces égales soit exactement perpendiculaire à l'alidade ; puis, mettant l'œil à la lunette mobile, on regarde à travers le prisme, le réticule du collimateur. Faisant ensuite tourner peu à peu le prisme au moyen de l'alidade, on déplace la lunette mobile, de manière à maintenir toujours la coïncidence entre les fils des deux réticules, et l'on cherche par tâtonnement la position pour laquelle la lunette mobile s'écarte le moins de la direction de la lunette fixe. Quand il en est ainsi, le prisme a la position qui correspond à la déviation minimum ; car de petits déplacements de l'alidade dans un sens ou dans le sens opposé, l'augmentent également. On trouve que l'alidade est alors également distante des deux lunettes ; d'où l'on

conclut que le rayon réfracté dans le prisme, est perpendiculaire à l'alidade, et par conséquent parallèle à la face qui sert de base, laquelle est également inclinée sur les deux autres faces, le prisme étant isocèle.

On voit que le goniomètre de M. Babinet peut servir à mesurer la déviation minimum. Quand on veut simplement obtenir cette mesure, on n'a plus besoin de placer la face qui sert de base perpendiculairement à l'alidade, et le prisme peut n'être pas isocèle.

Remarquons en terminant, que si le prisme était formé d'une substance moins réfringente que le milieu ambiant, le rayon, qui serait dévié vers le sommet (1968), éprouverait un *maximum* de déviation, au lieu d'un minimum, quand les angles d'incidence et d'émergence seraient égaux. On le verrait par les mêmes raisonnements que pour le minimum, en remarquant que r et r' seraient alors plus grands que i et e.

1976. CHAMBRES CLAIRES. — La *chambre claire* ou *camera lucida* nous offre une application des propriétés des prismes et du phénomène de la réflexion totale. Elle permet de dessiner les objets, en suivant sur le papier, le contour de leur image formée par l'instrument. La *chambre noire* servant au même usage, on a nommé, par opposition, *chambre claire*, l'instrument dont nous allons nous occuper, parce que les images s'y forment dans un espace éclairé. Une chambre claire très simple consiste en une glace sans tain, inclinée à 45°. En regardant verticalement, à travers cette glace, on voit une feuille de papier placée au-dessous, en même temps qu'on reçoit dans l'œil les rayons réfléchis provenant de la lumière émise par les objets éloignés, et formant une image virtuelle se projetant sur le papier. Mais comme le dessinateur doit être placé du côté opposé à ces objets pour ne pas intercepter les rayons qui en émanent, il voit l'image renversée, ce qui est très incommode. Wollaston obtient l'image droite en employant deux réflexions ; et pour éviter la perte de lumière qu'elles occasionnent, il se sert de la réflexion totale.

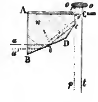


Fig. 1492.

Chambre claire de Wollaston. — Cet instrument consiste en un prisme horizontal quadrangulaire ABDC (*fig.* 1492), présentant un angle droit A et un angle très obtus D. La face AB est verticale et tournée du côté des objets à dessiner, de manière que les rayons, entrant à très peu près normalement à la face AB, ne sont pas sensiblement déviés. Ces rayons éprouvent sur la face BD la réflexion totale, se réfléchissent de nouveau totalement sur DC, et sortent sans déviation sensible par le bord de la face AC. L'œil qui reçoit ces rayons voit alors l'image des objets, dans le prolongement p des rayons émergents. L'œil doit être placé très près du bord de la face AC, de manière que la pupille *oo* dépassant un peu cette face, reçoive les rayons directs, tels que t, venant du papier. On pourra donc suivre le contour de l'image, avec la pointe d'un crayon. L'observateur, placé du côté C, n'intercepte pas les rayons incidents,

et voit l'image droite, les rayons tels que *a'* qui émanent des parties inférieures des objets, sortant plus près de l'angle C que ceux, tels que *a*, qui viennent des parties supérieures.

Il est facile de trouver la valeur à donner à l'angle D, pour qu'il y ait réflexion totale en *b* et *c*. L'angle *abn* devant être plus grand que l'angle limite, il en est de même de l'angle B qui lui est égal, puisque *ab* est perpendiculaire à AB. Il suffit donc que l'angle B soit plus grand que 42°, angle limite du verre. On fait les angles B et C de 67° 30', l'angle D est alors de 135°, et le rayon *cr* sort verticalement.

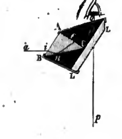


Fig. 1493.

1977. Chambre claire d'Amici. — Il faut une certaine habitude pour placer l'œil convenablement sur le bord du prisme de Wollaston, malgré la précaution que l'on prend d'appliquer sur la face AC une plaque de cuivre percée d'un trou par lequel on doit regarder. La chambre claire d'Amici (*fig.* 1493) est d'un usage beaucoup plus facile; mais l'image est plus faible, une des réflexions se faisant à la première surface d'une lame transparente. Un prisme isocèle horizontal ABC s'appuie par une arête sur une lame de verre à faces bien parallèles faisant un angle de 45° avec la face BC. L'œil placé en *o* peut voir à travers cette lame, dans la direction *op*, la pointe du crayon avec lequel on dessine, et en même temps il reçoit dans la même direction le rayon *ainero* venant d'un point de l'objet, et réfléchi en *n*, puis en *r* sur la face supérieure de la lame de verre. Comme les rayons qui viennent du crayon et ceux qui émanent de l'objet, entrent dans la pupille par le même point, il n'y a plus de difficulté à placer l'œil. La lame de verre et le prisme sont enveloppés d'une feuille de métal qui laisse à découvert la face AB par laquelle entrent les rayons qui viennent des objets, et la face LL, par laquelle on voit le papier sur lequel on dessine. En *o* est une petite ouverture, à laquelle on applique l'œil.



Fig. 1494.

Disposition et usage de l'appareil. — La figure 1494 représente la disposition de la chambre claire. Le prisme P est soutenu par une tige *t* composée de trois parties rentrant les unes dans les autres, comme les tuyaux d'une lunette, et à l'extrémité de laquelle il peut tourner dans tous les sens. La tige *t* est attachée par une charnière à une pince à vis V que l'on fixe au bord de la table. Un levier, articulé avec un anneau à vis de pression *v*, permet d'arrêter la tige dans une position fixe.

On commence par régler la distance du prisme au papier, de manière à donner au dessin la grandeur que l'on désire; les dimensions de l'objet et du

dessin étant en raison inverse de leurs distances au prisme. Mais quand ces distances ne sont pas égales, les pinceaux coniques qui entrent dans l'œil, provenant de l'objet et de la pointe du crayon, ne sont pas également divergents ; et l'on ne peut voir nettement en même temps l'image et le crayon. On remédie à cet inconvénient, en disposant dans le trajet d'un de ces pinceaux, des verres lenticulaires, *c*, en nombre convenable pour lui donner le même degré de divergence qu'à l'autre. Nous verrons plus tard comment ces verres peuvent remplir cette condition.

Il faut aussi que l'éclat de l'image et celle du papier ne diffèrent pas trop. Si l'image est faible, on projette sur le papier l'ombre d'un écran, ou bien on emploie des papiers gris, ou bien encore on amène dans le trajet des rayons qui en proviennent, un ou plusieurs verres bleus *b*, qui en affaiblissent l'éclat. Ces verres peuvent aussi être amenés devant le prisme, pour amortir l'éclat des rayons qui viennent de l'objet, quand l'image est trop brillante. — Avec la chambre claire de Wollaston, on peut faire varier l'éclat relatif de l'image et du papier par un léger déplacement de la pupille, de manière à présenter aux rayons directs et aux rayons réfléchis, qui ne passent pas par les mêmes points, une partie plus ou moins grande de cette ouverture.

Il existe d'autres espèces de chambres claires ; mais comme elles s'appliquent particulièrement aux microscopes, nous les décrirons en parlant de ces instruments.

§ 2. — RÉFRACTION DANS LES MILIEUX TERMINÉS PAR DES SURFACES COURBES. — LENTILLES.

I. Marche des rayons entrant par une surface sphérique, dans un milieu indéfini.

1978. Cas d'une portion de surface sphérique très petite par rapport à son rayon de courbure. — Soit *m*A (*fig.* 1495) une surface sphérique séparant deux milieux contigus, et supposons que le milieu qui est du côté concave de la surface soit le plus réfringent des deux. Soit *s* le point lumineux, que nous prenons, pour fixer les idées, dans le milieu le moins réfringent. Supposons que l'arc *m*A soit infiniment petit par rapport à son rayon de courbure A*o*, et joignons le point *s* au centre *o*. La ligne *so* se nomme l'*axe* relatif au point *s*. Un rayon incident, *sm*, se réfractera suivant *mf*, en se rapprochant de la normale, et viendra généralement couper l'axe A*o* en un point *f*, et nous allons chercher la valeur de la distance *f*A.

Abaissons sur les rayons incident et réfracté, les perpendiculaires *o*P, *o*O, et considérons A*m* comme une ligne droite ; les triangles rectangles *s*A*m*, *so*P, semblables, comme ayant l'angle *s* commun, donnent $so : sm = oP : Am$; ou en posant $sm = sA = p$, et $om = R$, $p + R : p = oP : Am$. Les triangles sem-

blables $fo\text{O}$, $f\text{A}m$ donnent de même $fo : f\text{A} = o\text{O} : \text{A}m$; et en posant $f\text{A} = fm = p'$, $p' - \text{R} : p' = o\text{O} : \text{A}m$. Divisant les deux proportions terme à terme, il vient $\frac{p+\text{R}}{p'-\text{R}} : \frac{p}{p'} = \frac{o\text{P}}{o\text{O}} : 1$. Or, $o\text{P}$ et $o\text{O}$ sont les *sinus* des angles d'incidence $\text{P}mo$, et de réfraction $\text{O}mo$, dans la circonférence de rayon mo; leur rapport est donc égal à l'indice de réfraction n ; on a donc $\frac{p+\text{R}}{p'-\text{R}} = \frac{p \cdot n}{p'}$. En faisant disparaître les dénominateurs, et divisant tous les termes par $pp'r$, il vient enfin

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{\text{R}}. \qquad [1]$$

Cette formule peut aussi se trouver par la méthode que nous avons employée pour les miroirs (1928) : dans le triangle mos, on a l'angle extérieur $\text{P}mo = i = s + \alpha$; et dans le triangle mof, $\alpha = r + f$. Comme les angles s, α et f sont infiniment petits, on peut les remplacer par leur *sinus*; et l'on a

$$\sin i = \sin s + \sin \alpha;\ \sin \alpha = \sin r + \sin f;\ \text{et de plus } \sin i = n \sin r.$$

Eliminant $\sin i$ et $\sin r$, et remplaçant $\sin s$, $\sin \alpha$ et $\sin f$ par leur valeur $m\text{A} : p$, $m\text{A} : \text{R}$, et $m\text{A} : p'$, on retrouve la formule [1].

Aberration de sphéricité. — La valeur de p' donnée par cette formule étant indépendante de l'angle d'incidence considéré, on en conclut que tous les rayons réfractés vont couper l'axe so en un même point ou *foyer* f. Ce résultat a encore lieu, mais seulement approximativement, quand l'arc $m\text{A}$, au lieu d'être infiniment petit, est très petit. Les rayons incidents les plus éloignés de l'axe donnent des rayons réfractés qui le coupent plus près du point A, de manière qu'il se forme une surface caustique présentant un sommet tourné du côté du centre. Ce défaut de concentration des rayons en un foyer exact constitue l'*aberration de sphéricité.*

Ce qui précède s'applique à une portion très-petite voisine du sommet, d'une surface de révolution quelconque dont l'axe passerait par le point lumineux. R est alors le rayon de la sphère osculatrice au point A.

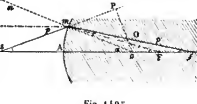
1979. Discussion. — Si nous posons $\frac{n\text{R}}{n-1} = a$, la formule [1] devient

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n}{a};\quad \text{d'où}\quad p' = \frac{anp}{np-a} = \frac{an}{n - \frac{a}{p}}. \qquad [2]$$

1° Supposons que la surface soit convexe du côté du point lumineux, et que celui-ci soit situé dans le milieu le moins réfringent. Si les rayons incidents sont parallèles, on a $p = \infty$, et il vient $p' = a$. Le foyer F se nomme alors *foyer principal*, et sa distance à la surface sphérique est $a = \frac{n\text{R}}{n-1}$, comme on peut le trouver directement. En effet, dans ce cas, l'angle d'incidence est égal

à l'angle mFA, et l'on a $moA = i = r + mFA$, ou, en prenant les *sinus* pour les angles, $\sin i = \frac{1}{n} \sin i + \sin mFA$. Remplaçant $\sin i = \sin moA$, et $\sin mFA$ par leurs valeurs $\frac{mA}{R}$ et $\frac{mA}{p}$, on trouve $p' = \frac{nR}{n-1}$.

Si le point s se rapproche, p diminuant, la valeur de p' augmente ; car $a : p$ augmentant, le dénominateur de p' diminue. Cela se voit facilement sur la figure; car, à mesure que le point s se rapproche, l'angle smn augmentant, il doit en être de même de l'angle omf ; le rayon réfracté se relève donc et va couper l'axe à une plus grande distance. Quand on a $\frac{a}{p} = n$, d'où $p = \frac{a}{n}$, p' est infini ; les rayons réfractés sont donc alors parallèles à so. Si p diminue encore, la valeur de p' devient négative ; ce qui veut dire que les rayons réfractés ne se rencontrent plus effectivement ; leurs prolongements forment alors un foyer virtuel placé du côté de s, et qui se rapproche du point A en même temps que le point lumineux. Enfin, quand on a $p = 0$, on a aussi $p' = 0$.


Fig 1495.

Si les rayons incidents sont convergents, il faut faire p négatif, et l'on voit que le foyer est toujours réel, et que p' diminue et devient nul avec p.

2° Si la surface est *concave*, il faut changer le signe de R, et par conséquent celui de a, et l'on a alors $p' = \frac{-anp}{np+a}$; quantité toujours négative tant que p reste positif, et dont la valeur absolue diminue et devient nulle en même temps que p. Le foyer est donc toujours virtuel. — Si p est négatif, c'est-à-dire si les rayons incidents sont convergents, p' est positif, et le foyer est réel quand on a $p < (a : n)$.

3° Si la surface était plane, il faudrait poser $R = \infty$, et par conséquent $a = \infty$, et l'on aurait $p' = -np$, comme nous l'avons déjà vu (1962). Si $p = \infty$, on a aussi $p' = \infty$; les rayons, qui entrent parallèlement, restent donc parallèles.

4° Si nous faisons $n = -1$, la formule devient $\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{-2}{R}$, ou $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$ suivant que la surface est convexe ou concave. On retrouve donc les formules des miroirs sphériques, comme on devait s'y attendre.

5° Nous avons encore à considérer le cas où le milieu dans lequel pénètrent les rayons, est moins réfringent que celui d'où ils partent ; alors il faut supposer $n < 1$. La formule [1] donne, en supposant R positif, c'est-à-dire

la surface convexe, $p' = \frac{-nR}{(1-n)+\frac{R}{p}}$. Pour $p = \infty$, on a $p' = -\frac{nR}{1-n}$ valeur négative ; le foyer principal est donc virtuel. Si p diminue, la valeur absolue de p' diminue aussi, pour devenir nulle en même temps que p. Si la surface est concave du côté du point lumineux, il faut faire R négatif ; la valeur de p' devient $p' = \frac{nR}{(1-n)-\frac{R}{p}}$, et l'on voit qu'elle est positive, et que le foyer est réel, jusqu'à ce qu'on ait $p = \frac{R}{1-n}$, auquel cas on a $p' = \infty$. Pour des valeurs plus petites de p, le foyer est virtuel. — Il est à remarquer que ces derniers résultats sont les mêmes que lorsque les rayons sont convergents et viennent du milieu le moins réfringent. Cela devait être, puisque les rayons suivent toujours la même route, quel que soit le sens de leur propagation (1948) ; seulement, il faut observer que la concavité et la convexité doivent toujours être considérées par rapport au point de concours des rayons incidents, que ce point soit réel ou virtuel. Du reste, tous les résultats qui précèdent peuvent se voir en construisant le rayon réfracté.

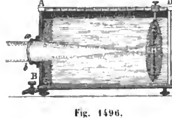
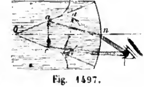


Fig. 1496.

1980. Vérifications expérimentales. — Tous ces résultats peuvent se vérifier par l'expérience, au moyen d'une cuve rectangulaire ABCD (*fig.* 1496), dont trois faces latérales sont formées de glaces. Au milieu de la face AB, qui est opaque, on visse successivement des cylindres, *ab*, fermés par une lame de verre sphérique convexe ou concave à faces bien parallèles. On remplit la cuve d'eau, puis on fait tomber sur la surface courbe *ab*, des rayons parallèles, divergents, ou convergents, et l'on observe leur marche dans le liquide, soit au moyen d'un écran en verre dépoli *e*, soit en troublant l'eau, de manière à distinguer directement la marche des rayons. Comme la déviation est assez faible, il est bon de relever d'abord, sur l'écran *e*, le diamètre de la section du faisceau à différentes distances de AB, quand il n'y a pas d'eau, pour le comparer ensuite à celui qu'on observe aux mêmes distances, quand la cuve est remplie. Les distances se mesurent sur la règle AD, et la grosseur du faisceau, sur un diamètre divisé, tracé sur l'écran.

1981. Objets vus dans un milieu terminé par une surface sphérique. — Supposons d'abord que la surface soit convexe ; alors chaque point de l'objet *ac*, placé dans le milieu (*fig.* 1497) forme sur l'axe qui lui correspond, un foyer virtuel situé entre ce point et la surface. Si la surface n'est pas d'étendue très petite par rapport à son rayon, ce foyer est le sommet, tourné

vers le centre, d'une caustique de révolution. Soient *oa* et *oc* les axes correspondants aux extrémités *a* et *c* de l'objet ; si nous menons, des bords de la pupille, des rayons tangents à la surface caustique *a'*, nous aurons le pinceau réfracté qui entre dans l'œil ; et en joignant au point *a* l'intersection *n* de ce pinceau avec la surface, nous aurons le pinceau *an* qui fait voir en *a'* l'image du point *a*. On construirait de même le pinceau réfracté qui fait voir en *c'* l'image du point *c*. Les extrémités de l'image étant tout près des axes *oa*, *oc*, et l'objet *ac* étant plus près de l'angle qu'ils forment, l'image sera grossie et rapprochée. Elle sera en même temps déformée ; les points de contact *a'*, *c'*... n'étant pas, sur chaque caustique, à la même distance du sommet. De plus, la position des points *a'*, *c'*... dépendant de celle de l'œil, il pourra arriver qu'on voie deux images, avec les deux yeux, si leur éloignement n'est pas négligeable par rapport à leur distance à *a'c'*. — Ces résultats s'observent fréquemment avec ces globes de verre dans lesquels on conserve des poissons vivants ; on voit ces animaux plus ou moins grossis et déformés, suivant leur distance à la surface.


Fig. 1497.

On montrerait tout aussi facilement que, si la surface était concave, les objets plongés paraîtraient plus petits, droits et rapprochés.

1982. Surfaces de séparation qui donnent un foyer exact. — Il est naturel de se demander, comme pour les miroirs courbes (1937), quelle forme

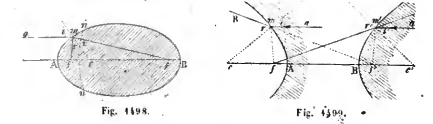


Fig. 1498. Fig. 1499.

il faudrait donner à la surface de séparation de deux milieux, pour que les rayons réfractés se réunissent rigoureusement en un seul point. Descartes démontre dans sa dioptrique que, *dans le cas des rayons parallèles* entrant dans le milieu le plus réfringent, on obtient un foyer exact quand la surface de séparation est celle d'un ellipsoïde de révolution dont l'axe est parallèle aux rayons, quand le rapport entre son grand axe et la distance des foyers, est égale à l'indice de réfraction. En effet, considérons le rayon incident *am* (*fig.* 1498), et supposons l'ellipsoïde tel que le rayon réfracté vienne passer par un de ses foyers *f*. L'angle *f'mc* sera égal à l'angle de réfraction $cmr = r$.

puisque la normale divise en deux parties égales l'angle des rayons vecteurs; et les triangles fmf et $mf'c$ donneront

$$mf' : mf = fc' : fc;\ \text{d'où}\ mf + mf' : fc + fc = f'm : fc = \sin i : \sin r = n.$$

Or, $fm + f'm = \overline{AB}$, et $f'c + fc = ff'$. — Il serait facile de voir que tout cela s'applique au cas d'une surface concave; seulement le foyer est alors virtuel.

Nous avons supposé que le rayon entrait dans le milieu le plus réfringent; si, au contraire, il entre dans le moins réfringent, la surface de séparation doit être un hyperboloïde de révolution autour de l'axe transverse parallèle aux rayons incidents. En effet, considérons la branche mA (*fig.* 1499) de l'hyperbole génératrice, et cherchons la condition pour que tous les rayons réfractés prolongés se coupent au foyer f'. Soit am un rayon incident, mc la normale, et mR le rayon réfracté, qui, prolongé, passe par le foyer f'. La normale à l'hyperbole divisant l'angle Rmf des rayons vecteurs en deux parties égales, le triangle mcf donne $mf : cf = \sin i : \sin r = n : 1$; et le triangle cmf', $f'm : cf' = \sin i : \sin r = n : 1$. En combinant ces deux proportions, on en tire $n : 1 = mf' - mf : cf' - cf$, ou $\overline{AB} : \overline{ff'} = n$, comme dans le cas de l'ellipsoïde. — Cela s'applique encore quand les rayons tombent sur une surface hyperboloïde concave, mais alors le foyer est *réel*. La partie de droite de la figure correspond à ce cas; les lettres sont les mêmes que dans la partie de gauche, seulement elles portent des accents.

Si les rayons, au lieu d'être parallèles, partent d'un point situé à une distance finie, Descartes démontre que, pour obtenir un foyer exact, il faut que la méridienne de la surface de révolution sur l'axe de laquelle se trouve le point lumineux, ait une forme telle que le rapport entre la différence des distances du point lumineux au point d'incidence d'un rayon et au sommet de la méridienne, et la différence des distances du foyer aux mêmes points, soit constant et égal à l'indice n. L'équation de la courbe, en prenant le point lumineux pour origine, et l'axe de révolution pour axe des abcisses, est $\sqrt{x^2+y^2} = c + n\sqrt{(x-p-p')+y^2}$; équation du 4e degré, dans laquelle c est une constante, n l'indice de réfraction, et p, p' les distances du point lumineux et du foyer au sommet de la surface de révolution.

II. Milieux terminés par deux surfaces sphériques. — Lentilles.

1983. Des lentilles. — On nomme *lentille*, en optique, un corps transparent terminé par deux surfaces sphériques. Quand les deux surfaces ne se rencontrent pas, elles sont réunies par une surface cylindrique qui ne joue aucun rôle dans les expériences. Plus généralemeent, on entend par lentille un corps transparent terminé par deux surfaces de révolution quelconques, dont les axes coïncident; mais, à moins qu'on n'avertisse du contraire, on suppose

toujours que les surfaces sont sphériques. Une de ces surfaces peut être plane, puisque le plan peut être considéré comme une surface sphérique dont le rayon est devenu infini.

L'*axe* d'une lentille est la ligne droite qui passe par les centres des deux *surfaces* sphériques qui la terminent. Quand une des faces est plane, l'axe est la perpendiculaire abaissée du centre de la face courbe, sur la face plane.

Différentes sortes de lentilles. — On divise les lentilles en *lentilles convergentes* et *lentilles divergentes*. Les premières ont la propriété de rapprocher les uns des autres, ou de faire converger, les rayons qui les traversent; on

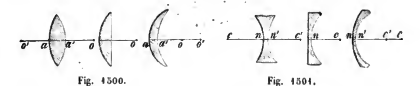


Fig. 1500. Fig. 1501.

les reconnaît en ce qu'elles sont plus épaisses au milieu que près du contour. Les secondes font, au contraire, diverger les rayons lumineux; elles sont plus minces au milieu que sur les bords.

Il y a trois espèces de lentilles *convergentes* (*fig.* 1500) : 1° la lentille *bi-convexe*, dont les deux faces sont convexes; les centres *o*, *o'* des surfaces sphériques *a*, *a'*, sont du côté opposé à ces surfaces. 2° La lentille *plan-convexe*, dont une des faces est plane; le centre unique *o* est du côté opposé à la surface courbe. 3° Le *ménisque convergent*, dont une des faces est concave, et possède un rayon de courbure *a'o'* plus grand que celui de la surface convexe, de manière que l'épaisseur est toujours plus grande au milieu; le centre *o'* de la surface concave est le plus éloigné de la lentille.

Il y a trois espèces de lentilles *divergentes* (*fig.* 1501) qui correspondent aux trois précédentes : 1° la lentille *bi-concave*; les centres sont du côté des surfaces qui leur correspondent. 2° La lentille *plan-concave*; le centre de la surface courbe est de son côté. 3° Le *ménisque divergent*; le rayon *n'c'* de la surface concave est moindre que celui de la surface convexe.

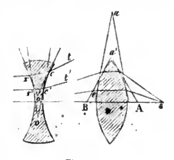


Fig. 1502.

On nomme *ouverture* d'une lentille, l'angle sous-tendu par la surface dont le rayon de courbure est le plns petit, et ayant son sommet au centre de courbure de cette surface.

Propriétés générales des lentilles. — Pour concevoir comment les lentilles plus épaisses au milieu que sur les bords peuvent rendre convergents

les rayons émanant d'un point *s* (*fig.* 1502), il suffit de remarquer qu'un rayon, *se*, qui traverse une semblable lentille, est dans le même cas que s'il traversait un prisme limité par les deux plans tangents aux points d'incidence et d'émergence, prisme dont le sommet *a* serait tourné du côté opposé à l'axe de la lentille. Le rayon émergent serait donc dévié vers cet axe. Dans le cas des lentilles plus minces au milieu, les deux plans tangents forment un prisme *cor*, *c'o'r'*, dont le sommet *o*, *o'* est du côté de l'axe; les rayons émergents *t*, *t'* sont donc déviés de manière à s'écarter de cet axe; ils sont donc rendus plus divergents.

1984. Formule des lentilles très minces et à très petite ouverture. — L'expérience montre que les rayons qui, partant d'un point situé sur l'axe, traversent une semblable lentille, convergente ou divergente, se réunissent *sensiblement*, eux ou leur prolongement, en un seul point de l'axe, nommé

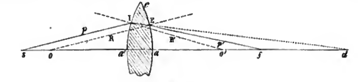


Fig. 1503.

foyer. Si l'épaisseur et l'ouverture de la lentille sont infiniment petites, les rayons émergents se réunissent exactement au même point.

Pour le démontrer, considérons la lentille, *aa'c* (*fig.* 1503), que nous supposons convergente, pour fixer les idées ; les centres des faces *a*, *a'* sont *o*, *o'*. Soit *s* un point lumineux situé sur l'axe *oo'*, à une distance de la lentille égale à *p* ; un rayon *sI* entrera dans la lentille suivant la direction IE, en se rapprochant de la normale I*o'*, et si le milieu était indéfini à droite de la face *a'c*, ce rayon irait couper l'axe en un point *d*, à une distance *a'd* liée à la distance *p*, par la formule $\frac{1}{p}+\frac{n}{a'd}=\frac{n-1}{R'}$, dans laquelle *n* est l'indice (1978). E*f* étant le rayon émergent, si nous considérons le milieu comme indéfini à la gauche de la face *ac*, un rayon qui suivrait la direction *f*E entrerait dans la lentille suivant EI, et son prolongement allant couper l'axe en *d*, on aurait $\frac{1}{fa}-\frac{n}{ad}=\frac{n-1}{R}$. Représentons la distance *fa* par *p'*, négligeons l'épaisseur *aa'*, et ajoutons les deux égalités membre à membre, nous aurons

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{n-1}{R}+\frac{n-1}{R'}=\frac{(n-1)(R+R')}{RR'};$$

formule qui montre que la valeur de *p'* ne dépend que des quantités constantes *p*, R, R' et *n*. Tous les rayons émergents iront donc couper l'axe en

un même point f, qui se nomme le foyer du point s. Réciproquement, si le point lumineux était en f, le foyer se formerait en s ; c'est pourquoi les points s et f se nomment collectivement *foyers conjugués*.

1985. Foyer principal. — Si les rayons incidents sont parallèles à l'axe, p est *infini*, et la valeur de p', que nous représenterons par a, devient

$$a = \frac{RR'}{(n-1)(R+R')}$$

ce que l'on peut trouver directement. Le point de concours des rayons est alors le *foyer principal*, et sa distance a à la lentille, la *distance focale principale*. Cette distance se désigne aussi sous le nom de *foyer*; c'est dans ce sens qu'on dit qu'une lentille a un long foyer ou un court foyer. On voit que la valeur $\frac{1}{a} = \frac{n-1}{R} + \frac{n-1}{R'}$ diminuant quand R et R' augmentent, la valeur de a varie dans le même sens que R et R'. Les lentilles dont le foyer est long sont donc celles dont les surfaces ont une courbure peu prononcée, ou dont l'épaisseur varie peu, du milieu aux bords. On voit aussi que, à égalité de courbure des faces, la distance focale diminue quand l'indice de réfraction augmente.

L'expression de a varie suivant la forme de la lentille. Si elle est convergente ou bi-convexe, les deux rayons de courbure sont égaux, et l'on a $a = \frac{R}{2(n-1)}$. Si l'une des faces, a', est plane, il faut faire $R' = \infty$, et il vient $a = \frac{R}{(n-1)}$, valeur moitié moindre que la précédente ; ce qui montre que les deux moitiés d'une lentille à faces égales concourent également à dévier les rayons lumineux. Si la lentille est un ménisque convergent, il faut changer le signe de R' et le supposer plus grand que R ; alors on a $a = \frac{-RR'}{(n-1)(R-R')}$; valeur positive, puisque R — R' est négatif.

Dans le cas des lentilles divergentes, a est toujours négatif, car il faut changer les signes de R et de R', excepté dans le cas du ménisque divergent, où il ne faut changer que le signe de R', mais le supposer en même temps plus petit que R. Les valeurs particulières de a sont alors, pour la lentille bi-concave à faces égales, $a = \frac{-R}{2(n-1)}$; pour la lentille plan-concave, $a = \frac{-R}{(n-1)}$; et pour le ménisque divergent, $a = \frac{-RR'}{(n-1)(R-R')}$.

Si, R' étant négatif, on avait $R = R'$, on trouverait $a = \infty$; et, en effet, les rayons seraient dans le même cas que s'ils traversaient un milieu terminé par deux faces parallèles, et d'épaisseur négligeable.

1986. Détermination du foyer d'une lentille. — Si la lentille est *convergente*, on fait tomber les rayons solaires parallèlement à son axe sur sa surface, et l'on cherche, avec un écran, la section la plus petite du cône

émergent. L'écran se trouve alors au foyer principal. — Si la lentille est divergente, on applique sur l'une de ses faces une bande de papier noir, ou une couche de noir de fumée, en ménageant deux petits trous a, b (*fig.* 1504), situés à la même distance de l'axe sur un même grand cercle. Faisant ensuite tomber les rayons solaires sur cette face, parallèlement à l'axe, on reçoit sur un écran $a'b'$, perpendiculaire à cet axe, les pinceaux émergents aa', bb'. On mesure la distance $a'b'$ et la distance $c'c$. On a alors $a'b' : ob = c'F : cF = c'c + cF : cF$; d'où l'on tire la valeur de cF.

On peut encore déterminer la distance focale principale, au moyen de la formule qui en donne la valeur en fonction de l'indice de réfraction et des rayons de courbure des faces. Nous verrons comment on mesure l'indice. Quant aux rayons de courbure, on les détermine au moyen d'un sphéromètre à deux pieds seulement, placés dans un même plan avec l'axe de la vis micrométrique, et à égales distances de cet axe. Après avoir amené la pointe de la vis sur la droite qui joint les pointes des deux pieds, on retire cette vis, de manière à pouvoir appuyer les trois pointes sur la surface de la lentille, suivant un grand cercle. Alors la distance des pieds représente le double du sinus de la moitié de l'arc α qu'ils embrassent, et la quantité dont on a retiré la vis, le *sinus verse*, v, de cet arc, et l'on a

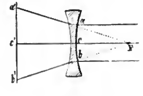


Fig. 1504.

$$R^2 = \sin^2 \tfrac{1}{2}\alpha + (R - v)^2; \quad \text{d'où} \quad R = \frac{\sin^2 \frac{1}{2}\alpha + v^2}{2v}.$$

1987. Discussion de la formule des lentilles. — Si l'on remplace le second membre par sa valeur en fonction de a, la formule devient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}; \quad \text{d'où} \quad p' = \frac{ap}{p-a} = \frac{a}{1 - \frac{a}{p}}.$$

On voit que p' varie dans le même sens que a, et qu'il est, par conséquent, d'autant plus petit, pour une même valeur de p, que les courbures de la lentille sont plus prononcées. On voit aussi que la formule est identique avec celle des miroirs sphériques ; seulement, a dépend ici de trois quantités : les deux rayons de courbure, et l'indice de réfraction n. La discussion se fera donc de la même manière, et conduira à des résultats analogues (1930).

Ainsi, dans le cas des lentilles *convergentes*, on verrait que, le point lumineux étant à l'infini, puis se rapprochant peu à peu, le foyer, d'abord à une distance a de la lentille, s'éloigne de plus en plus. Quand on a $p = 2a$, on a $p' = 2a$; et quand $p = a$, p' devient infini. Si p diminue encore, p' devient négatif ; le foyer est virtuel, et il se rapproche de la lentille et se confond avec elle en même temps que le point lumineux. Le foyer réel ou virtuel peut donc

occuper tous les points de l'axe, excepté ceux qui sont compris entre le foyer principal et la lentille. — Si les rayons incidents sont convergents, il faut faire p négatif; le foyer est toujours réel, et p' varie depuis a jusqu'à zéro, pendant que p diminue depuis l'infini négatif jusqu'à zéro.

Si la lentille est *divergente*, il faut faire a négatif (1985), et la formule montre que le foyer est toujours virtuel et ne peut être situé qu'entre le foyer principal et la lentille. Si les rayons sont convergents, on fait p négatif, et le foyer est réel quand p est moindre que a. — Enfin, si l'on suppose les faces de la lentille parallèle, il faut faire $a = \infty$ (1985), et l'on a $p = -p'$, comme dans le cas où les rayons traversent un milieu terminé par deux surfaces planes parallèles, et dont l'épaisseur serait négligeable.

On peut trouver tous ces résultats par la géométrie, sans se servir de la formule, en remarquant qu'un rayon traversant une lentille peut être considéré comme traversant un prisme (1983), et remarquant que, plus le point est éloigné, moins le rayon incident est incliné vers la base du prisme, plus le rayon émergent s'écarte alors du sommet (1969), et par conséquent plus il va couper l'axe près de la lentille.

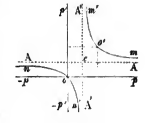


Fig. 1505.

Vérifications par l'expérience. — On peut vérifier tous ces résultats par l'expérience, au moyen d'une bougie, dans la chambre obscure. Il se forme au foyer, quand il est réel, comme nous le verrons bientôt (1992), une image, qui sert à reconnaître sa position, au moyen d'un écran. Si l'on veut se rendre compte des variations relatives des distances p et p', on construira graphiquement les valeurs de p et p', comme pour les miroirs sphériques (1930), et l'on trouvera qu'elles sont représentées par les abcisses et les ordonnées de l'hyperbole équilatère de la figure 1505. La branche mm' correspond à la lentille convergente recevant des rayons divergents; la partie on de l'autre branche, au cas où les rayons incidents sont convergents; et la partie on', au cas de la lentille divergente. Il ne faut pas oublier que la valeur de a dépend ici de trois quantités.

1988. Effets de la réunion de plusieurs lentilles dont les axes coïncident. — Supposons plusieurs lentilles quelconques placées les unes à la suite des autres, de manière que leurs axes coïncident, et assez rapprochées pour que les rayons lumineux les traversent toutes avant de rencontrer cet axe, et cherchons où les rayons lumineux partant d'un point, formeront leur foyer après avoir traversé ce système. Soit d, d', d''... les distances entre elles, des lentilles, dont on néglige toujours l'épaisseur, et a, a', a''... leurs distances focales principales, positives si les lentilles sont convergentes, et négatives si elles sont divergentes. La position du foyer formé par la première lentille seule sera donnée par la formule $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$. Les rayons émergents

tomberont sur la suivante en convergeant en un point situé à une distance $p'-d$ de cette dernière, si la première est convergente; ou en divergeant d'un point situé à une distance $d+p'$, si le foyer formé par la première lentille est virtuel; et l'on aura $\pm \frac{1}{p'\pm d}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a'}$. Les rayons tombant en convergeant sur la troisième lentille, on aurait de même $\pm \frac{1}{p''\pm d'}+\frac{1}{p'''}=\frac{1}{a''}$, et ainsi de suite; et pour la n^e lentille, $\pm \frac{1}{p_{n-1}\pm d_{n-2}}+\frac{1}{p_n}=\frac{1}{a_{n-1}}$. En éliminant $p', p''..., p_{n-1}$ entre ces équations, qui sont au nombre de n, on obtiendrait une seule équation, dans laquelle il n'entrerait que p, p_n, et $a, a', a''..., a_{n-1}$; $d, d'..., d_{n-1}$, et de laquelle on tirerait la valeur de p_n, c'est-à-dire la distance du foyer à la dernière lentille.

Si les lentilles, dont l'épaisseur est toujours supposée négligeable, sont en contact, $d, d', d''...$ sont nuls, et l'élimination se fait facilement en ajoutant ou retranchant membre à membre les égalités successives, et il vient $\frac{1}{p}+\frac{1}{p_n}=\frac{1}{a}\pm\frac{1}{a'}\pm...\pm\frac{1}{a_{n-1}}$. L'unité divisée par le second membre représente la distance à la dernière lentille, du foyer principal du système.

1989. Cas de deux lentilles convergentes. — On emploie fréquemment dans les instruments d'optique, le système de deux lentilles convergentes placées à une certaine distance l'une de l'autre; c'est pourquoi nous allons le considérer en particulier.

1° Supposons que le point lumineux soit situé à une distance p de la première lentille, plus grande que le foyer a, et que la seconde lentille soit à une distance d de la première plus petite que la distance p' où se fait le foyer conjugué. Les rayons émergeant de la première, tomberont en convergeant sur la seconde, et l'on aura

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a},\ \text{et}\quad \frac{-1}{p'-d}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a'};\ \text{d'où}\ p''=\frac{a'}{1+\frac{a'}{p'-d}}.$$

p, et par suite p' étant supposés constants, et d étant moindre que p', on voit que p'' diminue quand d augmente; le foyer se rapproche donc de la seconde lentille quand on l'écarte de la première. Si les rayons incidents étaient parallèles à l'axe, il faudrait remplacer p' par a, et p'' serait la distance du foyer principal, à la seconde. Les deux lentilles forment donc un système à foyer variable, dans lequel le foyer se rapproche ou s'éloigne de la dernière, quand on l'éloigne ou qu'on la rapproche de la première.

2° Supposons que le point lumineux soit plus près de la première lentille que son foyer principal; alors p' est négatif, et les rayons tombent sur la seconde lentille, comme s'ils venaient du foyer virtuel de la première, situé à une distance de la seconde égale à $p'+d$; on aura donc pour celle-ci :

$$\frac{1}{p'+d}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a'}\,;\qquad \text{d'où } p''=\frac{a'}{1-\dfrac{a'}{p'+d}}.$$

On voit que p'' augmente quand d diminue. Le foyer conjugué s'éloigne donc quand on rapproche les lentilles. La valeur de p'' devient infinie quand on a $a'=p'+d$; c'est qu'alors le foyer virtuel d'où semblent émaner les rayons qui viennent à la seconde lentille, coïncide avec son foyer principal. Si l'on a $a'>(p'+d)$, p'' est négatif, et le foyer du système est virtuel.

1990. Cas où le point lumineux est situé hors de l'axe. — Nous avons supposé jusqu'à présent que le point lumineux était situé sur l'axe de la lentille; considérons maintenant le cas où il n'en est pas ainsi. Nous admettrons dans tout ce qui suit que le point lumineux situé hors de l'axe, en est cependant très peu éloigné par rapport à sa distance à la lentille; ce qui a toujours lieu dans les instruments d'optique.

Nous allons d'abord démontrer que, parmi les rayons qui partent d'un point lumineux situé hors de l'axe, il y en a toujours un qui traverse la lentille sans éprouver de déviation. Menons à la face *a* (*fig.* 1506), un plan tangent en un point *n* peu éloigné de l'axe *oo'*; il sera toujours possible d'en mener un autre tangent à la face *a'* et parallèle au premier. Car, si nous abaissons une perpendiculaire *o'n'*, du centre *o'* sur ce premier plan, un plan tangent au point *n'* lui sera parallèle. Joignons les points *n*, *n'*; un rayon incident, qui donnerait un rayon réfracté traversant la lentille suivant *nn'*, donnerait un rayon émergent parallèle au rayon incident, puisqu'il serait dans le même cas quo s'il traversait un milieu terminé par deux plans parallèles. Or, un semblable rayon existe toujours; car, si nous faisons tourner le rayon *sn* dans le plan de la figure autour du point *n*, nous finirons par trouver un angle d'incidence tel que l'angle de réfraction soit égal à *cno*.

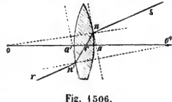


Fig. 1506.

Centre optique d'une lentille. — Nous allons maintenant montrer que le point *c* où le rayon réfracté coupe l'axe, est le même pour tous les rayons réfractés qui correspondent à des rayons incident et émergent parallèles entre eux; d'où il faudra conclure qu'il existe pour chaque point lumineux peu éloigné de l'axe, un rayon incident qui émerge sans déviation; car, en faisant tourner *nn'* autour du point *c*, on finira par trouver un angle de réfraction correspondant à un rayon incident passant par le point donné. Cherchons donc la position du point *c*, ou sa distance à la face *an*. Les triangles *nco*, *n'co'*, semblables puisque les normales *on* et *o'n'* sont parallèles, donnent, en appelant R et R' les rayons de courbure,

$$\overline{oc} : \overline{o'c} = \overline{on} : \overline{o'n'} = \text{R} : \text{R}';$$

$$\text{d'où} \quad \overline{on} - \overline{oc} : \overline{o'n'} - \overline{o'c} = \mathrm{R} : \mathrm{R}', \quad \text{ou} \quad \overline{ac} : \overline{ca'} = \mathrm{R} : \mathrm{R}'.$$

Le point c partage donc l'épaisseur e de la lentille en parties proportionnelles aux rayons de courbure de ses faces. On tire de là

$$\overline{ac} + \overline{a'c} : \overline{ac} = \mathrm{R} + \mathrm{R}' : \mathrm{R} ; \quad \text{d'où} \quad \overline{ac} = \frac{\mathrm{R}e}{\mathrm{R} + \mathrm{R}'},$$

valeur qui ne dépend que des quantités constantes R, R′, e. Le point c, où tous les rayons qui traversent la lentille sans éprouver de déviation, coupent l'axe, se nomme *centre optique* de cette lentille.

Discussion. — Prenons la valeur de ca positivement quand elle est comptée à gauche du point a. Si l'on a $\mathrm{R} = \mathrm{R}'$, le centre optique c se trouve au milieu de l'épaisseur de la lentille, puisque l'on a alors $ac = \frac{1}{2}e$. Si la lentille est plan convexe, on a $\mathrm{R} = \infty$, et il vient $ac = e$; le centre optique est donc situé sur la face courbe; ce qu'il est facile de voir directement. En effet, quel que soit le point d'immergence sur la face plane Aa (*fig.* 1507), le point d'émergence devra être en e, seul point où un plan tangent à la face courbe soit parallèle à Aa, si l'on veut que le rayon émergent soit parallèle au rayon incident. — Dans le cas du ménisque convergent, R est négatif et plus grand que R′. La valeur

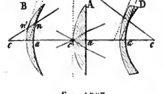


Fig 1507.

de ca (*fig.* 1506) devient alors $\frac{\mathrm{R}e}{\mathrm{R} - \mathrm{R}'}$; quantité positive et plus grande que e. Le centre optique se trouve donc hors de la lentille, du côté de la face convexe; ce que l'on peut reconnaître directement, en remarquant que les points de contact des plans tangents parallèles, sont du même côté de l'axe, et que celui qui se trouve sur la surface concave en est plus éloigné que l'autre, comme on le voit en n, n' (*fig.* 1507).

Si la lentille est *divergente* et bi-concave, il faut changer les signes de R et R′; ce qui ne modifie pas le signe de ca; le centre optique sera donc toujours dans l'épaisseur de la lentille, et au milieu si l'on a $\mathrm{R} = \mathrm{R}'$. Dans le cas de la lentille plan-concave, on a $\mathrm{R} = \infty$, et $ca = e$; le centre optique se trouve donc sur la face courbe. Enfin, dans le cas du ménisque divergent, il faut faire R seulement négatif, et le supposer plus petit que R′; la face a est concave, et la valeur $ac = \frac{\mathrm{R}e}{\mathrm{R}' - \mathrm{R}}$ est négative et plus grande que e; ce qui montre que le centre optique se trouve hors de la lentille du côté de la face qui a le plus petit rayon, qui est ici la face concave. On peut le voir directement; car les points de contact des plans tangents parallèles sont du même côté de l'axe, et celui de la face concave est le plus rapproché de cet axe, comme on le voit en D (*fig.* 1507).

1991. Foyers conjugués sur les axes secondaires. — Un rayon qui traverse une lentille en passant par son centre optique, n'éprouve pas de déviation, mais seulement un déplacement latéral, qui est négligeable comme l'épaisseur de la lentille. On peut donc regarder ce rayon comme formant une ligne droite. Cette droite se nomme l'*axe secondaire* du point lumineux qui a fourni le rayon.

Cela posé, nous allons montrer qu'un point lumineux situé hors de l'axe principal, donne un foyer conjugué sur son axe secondaire, pourvu que ce dernier fasse un très petit angle avec l'axe de la lentille. En effet, soit s (*fig.* 1508) le point lumineux, scf son axe secondaire, et sm un rayon incident que nous supposons dans le plan sca. Ce rayon donne le rayon émergent mf qui coupe l'axe secondaire en f, et il faut faire voir que la distance fc est indépendante du rayon incident particulier sm. Les rayons sm et mf coupent l'axe principal en a et F ; et l'angle sca étant très petit, nous pouvons poser $sm = sc = p$,

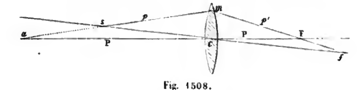


Fig. 1508.

et $mf = cf = p'$. Si, de plus, nous posons $ac = \mathrm{P}$ et $c\mathrm{F} = \mathrm{P}'$, nous aurons $\frac{1}{\mathrm{P}} + \frac{1}{\mathrm{P}'} = \frac{1}{a}$, les points a et F étant des foyers conjugués situés sur l'axe principal. Le triangle $am\mathrm{F}$ coupé par la sécante sf, donne

$$sa \times c\mathrm{F} \times mf = sm \times \mathrm{F}f \times ca, \qquad [1]$$

d'aprés le théorème des transversales, qui dit que la sécante détermine sur les côtés du triangle deux segments qui sont tels que le produit de trois d'entre eux n'ayant pas d'extrémité commune, est égal au produit des trois autres. L'égalité [1] revient à $(\mathrm{P} - p) \cdot \mathrm{P}' \cdot p' = p\,(p' - \mathrm{P}') \cdot \mathrm{P}$. Effectuant les opérations, et divisant par le produit $pp'\,\mathrm{PP}'$, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{\mathrm{P}} + \frac{1}{\mathrm{P}'} = \frac{1}{a}. \qquad [2]$$

La valeur de p' est donc la même pour tous les rayons incidents, et la distance focale principale correspondante aux rayons parallèles à sc, est a, comme pour les rayons parallèles à l'axe ac[1]. Tous les foyers formés par les rayons parallèles, de différente direction, seront donc sur un même arc de cercle décrit du point c comme centre avec un rayon égal à $a = \frac{\mathrm{RR}'}{(n-1)(\mathrm{R}+\mathrm{R}')}$, et

[1] *Cours de physique de l'École polytechnique*, par G. Lamé, 32e leçon.

tout ce que nous avons dit sur la position relative des foyers conjugués situés sur l'axe principal, peut s'appliquer au cas où ils sont situés sur un axe secondaire faisant un trés petit angle avec ce dernier.

Dans le cas de deux lentilles, pour trouver l'axe secondaire sur lequel se forme l'image d'un point lumineux, on construit d'abord, le foyer réel ou virtuel formé par la premiére lentille seule, puis on joint ce foyer au centre optique de la seconde.

1992. Images formées au foyer des lentilles convergentes. — Considérons un objet AC (*fig.* 1509) placé à une distance d'une lentille convergente, plus grande que son foyer principal. Tous les rayons partant du

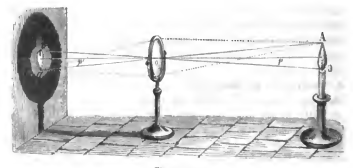


Fig. 1509.

point A et traversant la lentille, vont converger en un point *a* de l'axe secondaire A*oa*, *o* étant le centre optique. De même, le point C fera son foyer ou son image en *c*, sur l'axe secondaire C*oc*, et ainsi des autres points de l'objet. On aura donc, sur un écran placé en *ae*, une image *renversée* de l'objet AC. Si l'on fait l'expérience dans la chambre obscure, au moyen d'une bougie, on remarque que l'image se trouve au milieu d'un espace circulaire obscur, qui n'est autre chose que l'ombre de la lentille sur l'écran ; car les rayons qui la traversent étant tous déviés vers les différents foyers qu'ils forment, l'écran ne reçoit de lumiére dans l'intérieur de l'ombre géométrique qu'aux divers points de cette image. Le reste de l'écran est faiblement éclairé par les rayons directs venant de la bougie.

Remarque. — Si l'objet avait tous ses points sur une surface sphérique ayant son centre au centre optique, les images de ces points seraient situées sur une autre surface sphérique ayant le même centre ; car les distances des images sont les mêmes pour les points situés à égale distance de la lentille (1991). Mais si l'objet est dans un plan parallèle au contour de la lentille, les points voisins de l'axe principal se trouvant plus prés du centre optique que les autres, feront leur foyer à une plus grande distance ; de sorte que l'écran devrait avoir une surface plus concave que celle d'une sphère ayant son centre

au centre optique, pour se trouver au foyer de tous les points. Mais si l'objet est très petit par rapport à sa distance, cet effet est insensible, et l'image est nette sur un écran plan. Il en est encore ainsi quand les points de l'objet, très éloigné, sont à des distances inégales de la lentille ; les distances des foyers différant alors très peu (1987).

Grandeur de l'image. — Le rapport entre la grandeur de l'image et celle de l'objet est égal au rapport entre leurs distances p, p' à la lentille, puisque les triangles AoC et *aoc* (*fig.* 1509) étant semblables, on a $AC : ac = p : p'$. Le dernier terme se déduit de la formule des lentilles, en supposant connue la distance focale principale a. L'objet et son image sont égaux quand on a $p = 2a$, car, alors, on a aussi $p' = 2a$ (1987). Il résulte de là un moyen d'évaluer a pour une lentille convergente, sans se servir des rayons solaires ; il n'y a qu'à chercher à quelle distance un objet doit être placé pour que son image lui soit égale. On prend pour objet une règle divisée fortement éclairée. M. Silbermann a imaginé un appareil nommé *foromètre* destiné à faire commodément cette expérience.

1993. Aberration de sphéricité des lentilles. — Halley est le premier qui ait appliqué l'algèbre à l'étude des propriétés des lentilles, en 1693. Ditton, en 1705, fit la même chose pour les miroirs sphériques ; et, depuis, divers mathématiciens, entre autres Wolf, Cotes, Euler, Lagrange, Mobius, ont publié des recherches sur le même sujet. Nous avons vu avec quelle simplicité et quelle élégance les résultats sont représentés, quand on suppose la lentille très mince et son ouverture très petite. Mais ces suppositions, surtout la première, ne sont pas toujours réalisées dans les lentilles qui entrent dans les instruments d'optique. Biot [1], M. Gauss [2], M. Leboucher [3], ont traité la question d'une manière générale, chacun à son point de vue. Nous ne pouvons, sans sortir de notre cadre, donner le détail de ces recherches mathématiques ; nous allons seulement faire connaître les résultats généraux que l'on obtient avec les lentilles épaisses et à grande ouverture.

Caustiques formées par les lentilles. — Quand des rayons partant d'un point situé sur l'axe principal, ou sur un axe secondaire peu incliné sur ce dernier, traversent une lentille, les rayons qui émergent près des bords sont plus déviés qu'il ne faut pour se rencontrer au foyer formé par ceux qui passent près de l'axe. Il résulte de là que, si les rayons émergent en divergeant, ceux qui passent près des bords vont couper virtuellement l'axe plus loin de la lentille que les autres. Si, au contraire, les rayons sont convergents, ceux qui émergent près des bords rencontrent l'axe plus près de la lentille ; de sorte que les rayons compris dans un même plan passant par l'axe, se coupent deux à deux, en formant une courbe caustique convexe vers cet axe. Si donc on cherche avec un écran,

[1] *Traité élémentaire d'astronomie physique*, t. I.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIII, p. 259.
[3] *De la formation des caustiques dans les milieux réfringents*, Caen, 1850.

le foyer du point lumineux, on le verra entouré d'une auréole formée par les rayons qui se croisent à différents points de l'axe. S'il s'agit d'un objet lumineux, comme la flamme d'une bougie, l'image focale paraîtra, de même, entourée d'une auréole, qui en troublera la netteté, comme on le voit dans la figure 1509. Pour prouver que cette auréole est due aux rayons qui passent près des bords de la lentille, il suffit de les intercepter au moyen d'un écran annulaire; aussitôt l'auréole disparaît, et l'image devient plus nette. Si, au contraire, on intercepte, au moyen d'un écran circulaire, les rayons qui tombent près de l'axe, l'image devient confuse, et il faut, pour la voir nettement, rapprocher l'écran jusqu'au foyer des rayons qui tombent près des bords.

M. Herschel indique un moyen simple de comparer les directions des rayons qui traversent une grande lentille à différentes distances de l'axe. On la recouvre d'une feuille de papier, dans laquelle sont ménagés de petits trous également espacés sur un même grand cercle, on la présente aux rayons solaires, et l'on voit les rayons qui traversent les trous former des taches lumineuses également espacées sur un écran très rapproché. Mais si l'on écarte peu à peu l'écran, les taches les plus éloignées de l'axe se resserrent plus que les autres, puis se réunissent successivement deux à deux, pour changer ensuite de place l'une par rapport à l'autre. Le point où se fait la rencontre de deux faisceaux voisins appartient à la caustique.

Mesure de l'aberration. — Le défaut de concours au même point, des rayons émergents, constitue l'*aberration de sphéricité* de la lentille. On distingue l'aberration *transversale*, produite par la lumière jetée autour de l'image du point lumineux, par les rayons se croisant plus près de la lentille, et qui se mesure par le diamètre de l'auréole qui entoure le foyer formé par les rayons centraux; et l'aberration *longitudinale*, qui consiste en ce que les rayons qui émergent par des circonférences perpendiculaires à l'axe ayant des rayons différents, font leurs foyers à différents points de l'axe. On la mesure par la distance des foyers formés par les rayons centraux et par les rayons qui passent près des bords de la lentille. L'endroit où la lumière est la plus vive n'est pas au sommet de la caustique, mais en un point plus rapproché de la lentille, les rayons centraux étant moins nombreux que les autres.

Quand on veut que les effets de l'aberration d'une lentille de verre soient insensibles, il faut que son ouverture ne dépasse pas, en général, 10 à 12°. Si donc on veut donner à cette lentille un grand diamètre, pour que l'image focale soit très brillante, elle devra avoir des courbures peu prononcées, et par conséquent un très long foyer. Les lentilles très convergentes, pour être dépourvues d'aberration sensible, devront, par une semblable raison, n'avoir qu'un très petit diamètre, puisque les rayons de courbure étant très courts, l'angle d'ouverture ne peut être très petit qu'autant que le diamètre de la lentille est lui-même très petit.

On a reconnu, par les méthodes que nous venons d'indiquer, ainsi que par le calcul, que l'aberration varie suivant la manière dont sont tournées les faces

de la lentille; elle est la plus faible quand la face la plus courbe est traversée par les rayons les moins divergents. Quand il s'agit de rayons parallèles et d'une lentille bi-convexe en verre ayant un indice égal à 1,5, l'aberrration est la plus faible quand les rayons de courbure sont entre eux comme 1 : 6. Si des rayons parallèles passent par la face dont le rayon est 6, l'aberration longitudinale est 1,07 de l'épaisseur, et elle devient 3,45 quand la face la moins courbe est tournée vers les rayons parallèles. — Quand l'indice est 1,686, comme cela a lieu à peu près pour le cristal ou *flint-glass*, l'aberration est très faible quand la lentille ayant une face plane, cette face est traversée par les rayons les plus divergents ; aussi, les lentilles plan-convexes sont-elles fréquemment employées dans les instruments d'optique.

Les ménisques donnent les meilleurs résultats, parce que l'aberration produite à l'une des faces est en partie détruite par celle qui se fait en sens contraire à l'autre face. L'expérience prouve que l'aberration est la plus faible avec un ménisque de verre, quand les rayons de courbure sont dans le rapport de 3 à 8, la face la plus courbe étant toujours tournée du côté des rayons les moins divergents.

On forme un système très convergent, sans aberration sensible et ayant une ouverture assez grande, en associant deux lentilles convergentes séparées par un certain espace. Ordinairement, on réunit deux lentilles plan-convexes, dont on tourne la face courbe du côté des rayons les moins divergents. L'expérience montre que l'aberration est beaucoup plus faible que celle d'une seule lentille de même diamètre et de même foyer que le système. Le calcul prouve qu'on peut toujours avec deux lentilles convergentes dont les courbures et la distance sont convenables, obtenir un foyer exact pour les rayons partant d'un point donné pris sur l'axe principal.

Lentilles aplanétiques. — On nomme ainsi, les lentilles complétement dépourvues d'aberration de sphéricité. On peut former une lentille aplanétique, en prenant pour face d'émergence la surface de révolution qui donne un foyer exact dans un milieu indéfini (1982) ; par exemple, la portion *nAn* de l'ellipsoïde de la figure 1498 ; et pour face d'émergence, une surface sphérique *nn* décrite du foyer *f* comme centre avec un rayon tel que cette surface coupe la première. Le foyer exact formé dans le milieu indéfini sera aussi le foyer de la lentille ainsi formée, puisque les rayons sortant de la lentille normalement à la surface sphérique, n'éprouvent pas de déviation en émergeant. La lentille *nAn* serait donc *aplanétique*, pour les rayons parallèles à son axe.

1994. Champ d'une lentille. — On appelle *champ* d'une lentille, l'espace angulaire dans lequel sont contenus tous les axes secondaires sur lesquels il se forme des images nettes. On remarque, en effet, que les points lumineux qui s'écartent trop de l'axe principal, ne donnent que des images confuses. Les ménisques convergents, dont la face concave est tournée du côté de l'objet, ont un champ beaucoup plus grand que les autres lentilles de même diamètre et de même foyer. De plus, quand l'image est reçue sur un écran plan, perpen-

diculaire à l'axe principal, les foyers des points les plus écartés de cet axe tendent à se former sur l'écran, quoique sa surface ne soit pas partout également éloignée du centre optique ; les distances focales, dans ces sortes de lentilles, croissant en même temps que l'obliquité des axes. Wollaston avait adopté, pour le rapport le plus favorable entre les rayons de courbure des deux faces, celui de 2 à 1 ; mais M. Cauchois a trouvé que ce rapport doit être de 8 à 5.

III. Instruments relatifs aux images réelles formées par les lentilles.

1995. Chambre noire. — Les images qui se forment au foyer des lentilles convergentes ont reçu des applications dans plusieurs instruments d'optique. J.-B. Porta, après avoir inventé la chambre noire simple (1874), y produisit des images brillantes et nettes au moyen d'un miroir sphérique concave (1936).

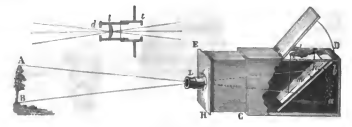


Fig. 1510.

Plus tard, il adapta à l'ouverture une lentille convergente, et obtint des résultats qui le frappèrent d'admiration, et dont il garda longtemps le secret. L'instrument ainsi construit se nomme *chambre noire composée*. L'image formée au foyer de la lentille est renversée, et d'autant plus éclatante qu'il y a plus de rayons concentrés en chaque point, c'est-à-dire que le diamètre de la lentille est plus grand. L'écran blanc sur lequel on reçoit cette image, doit être placé à une distance déterminée, qui dépend de celle de l'objet ; il en résulte que les points situés à différentes distances de la lentille, ne peuvent se peindre avec la même netteté. Cependant, quand ces objets sont tous très éloignés, comme de grandes différences de distances n'en apportent, alors, que de très faibles dans la position de l'image (1987), toutes les parties paraissent également nettes. On peut augmenter le champ de l'appareil, en employant un ménisque convergent dont la face concave est tournée vers les objets (1994).

Chambre noire à tiroir. — Le renversement de l'image formée dans la chambre noire peut être évité par divers moyens. La figure 1510 représente une chambre noire portative, dite *à tiroir*, dont se servent les paysagistes. En L, est la lentille, nommée *objectif*, parce qu'on la tourne vers les objets dont on veut

former l'image ; on en voit la coupe en l ; un diaphragme d arrête les rayons tombant trop près du bord, pour éviter l'aberration de sphéricité. Cette lentille est adaptée à un tube qui peut glisser dans un autre fixé à la caisse HD. Cette caisse est noircie en dedans, et la lumière n'y peut pénétrer qu'à travers la lentille. Un miroir plan m, incliné à 45°, réfléchit, sur une lame de verre horizontale v, les rayons qui ont traversé l'objectif. Si l'on enlevait ce miroir, les images se formeraient en ba, mais les rayons qui convergeraient en a sont réfléchis et viennent converger sur la lame de verre $a'v$, en un point a' symétrique du point a. De même, l'image qui se formerait en b se forme en v, et ainsi des autres. On voit que l'image ba étant renversée, celle qui se formera

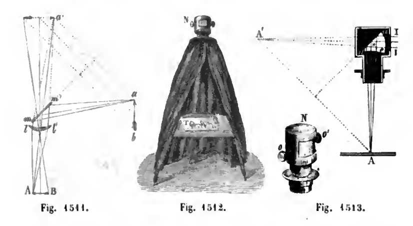


Fig. 1511. Fig. 1512. Fig. 1513.

en $a'v$ sera droite pour un observateur placé derrière le miroir m. Cet observateur doit être enveloppé d'une draperie noire qui empêche la lumière extérieure de tomber sur la surface $a'v$. Pour régler la distance de l'écran à la lentille, d'après l'éloignement des objets, ce qui s'appelle mettre l'instrument *au point*, on fait glisser la partie EC de la boîte, dans la partie CD, et l'on termine en enfonçant plus ou moins le tube L dans celui qui le porte.

Si l'on ne veut pas que l'image soit trop petite, il faut que la lentille ait un long foyer, et, par conséquent, que la caisse HD soit très longue, ce qui la rendrait embarrassante. Nollet a imaginé une disposition qui permet d'obtenir, avec un appareil portatif, des images suffisamment grandes. Trois pieds (*fig.* 1512), pouvant se plier en deux pour le transport, soutiennent une tablette T, sur laquelle on place une feuille de papier. L'objectif est représenté à part en ll' (*fig.* 1511) ; il est ajusté dans un tube vertical pouvant glisser, pour la *mise au point*, dans un disque horizontal en bois, auquel sont articulés les trois pieds. Un miroir métallique mm', incliné à 45°, renvoie suivant la verticale, les rayons sensiblement horizontaux qui viennent des objets éloignés, de manière que l'image vient se peindre sur la feuille de papier AB, comme si

les rayons partaient des points, tels que *a'*, symétriques de ceux de l'objet *ab* par rapport au plan du miroir *mm'*. On peut, en faisant tourner le miroir autour d'un axe vertical, projeter en T (*fig.* 1512) l'image des objets distribués tout autour de l'appareil. Un rideau noir empêche la lumière extérieure de se répandre sur la feuille de papier.

La réflexion sur un miroir incliné présente plusieurs inconvénients : on doit employer un miroir en métal, les miroirs de glace donnant plusieurs images; or, les miroirs de métal réfléchissent peu de lumière et ils s'altèrent facilement. On a levé la difficulté en employant la réflexion totale intérieure, sur la grande face d'un prisme dont la section droite est un triangle rectangle isocèle, et dont une des petites faces est horizontale, et l'autre verticale.

Prisme-ménisque. — M. Ch. Chevallier a employé un prisme, qui sert à la fois de lentille et de réflecteur, dont on voit la section droite en *anc* (*fig.* 1513); la surface antérieure, tournée vers les objets, est de forme sphérique convexe. Si le milieu était indéfini derrière cette surface, des rayons I, I partant d'un point lumineux feraient leur foyer en A'. Mais les rayons qui convergent vers A' se réfléchissent totalement en dedans sur la surface *an* inclinée à 45° sur l'horizon, et se réunissent en A, point symétrique de A' par rapport au plan *an*. On donne une légère courbure concave à la face d'émergence *nc*, pour que les rayons convergents, sortant dans une direction normale à cette face, n'éprouvent pas de nouvelle déviation. On voit en N l'ensemble du prisme et de sa garniture métallique; il peut se mouvoir autour d'un axe horizontal *oo'*, de manière à se tourner, entre certaines limites, vers les objets dont on veut obtenir l'image. Le tube qui termine verticalement la garniture, peut glisser dans un anneau fixe, pour la mise au point. L'appareil de la figure 1512 est muni du prisme-ménisque.

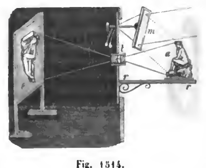


Fig. 1514.

Nous verrons comment on parvient à fixer sur l'écran qui les reçoit, les images formées dans la chambre noire. Les plus fins détails, et, par conséquent, les moindres défauts de l'image, se reproduisant avec une fidélité admirable, il faut que cette image se forme avec la plus grande netteté. Il a donc fallu perfectionner les objectifs. Nous reviendrons sur ce sujet, quand nous traiterons des effets chimiques des rayons lumineux, et des applications à la *photographie*.

1096. Mégascope. — Le *mégascope* sert à faire la copie amplifiée de statuettes, bas-reliefs, tableaux. C'est une espèce de chambre noire de grandes dimensions, et dans laquelle entre le dessinateur. On détermine la distance de l'objet à la lentille, de manière à obtenir une image de grandeur voulue, dont il n'y a plus qu'à suivre les contours avec un crayon. Voici comment on procède :

l'objet *a* (*fig.* 1514) est placé en dehors du volet d'une chambre obscure, et peut glisser sur de petits rails *rr*, de manière qu'on peut, en tirant des cordons dont l'extrémité est dans la chambre obscure, faire varier la distance de cet objet à la lentille, qui est ajustée à l'ouverture du volet, dans un tube horizontal *t*; l'image renversée de l'objet va se peindre sur un écran translucide *e*, de manière qu'on peut la dessiner, en se plaçant par derrière pour ne pas intercepter les rayons lumineux. Si l'on veut que cette image soit droite, on renverse l'objet.

L'image étant amplifiée, la lumière qui la forme est répartie sur une grande surface, ce qui en affaiblit l'éclat; il faut donc, pour que cette image soit suffisamment brillante, que l'objet soit fortement éclairé. C'est ce qu'on obtient en renvoyant les rayons solaires sur les parties tournées du côté de la lentille, au moyen d'un miroir plan *m*, que l'on dirige en tirant des cordons et en faisant tourner sur lui-même le support horizontal auquel il est articulé. De plus, pour que chaque foyer reçoive beaucoup de rayons, on donne un grand diamètre à l'objectif, 10cm environ. Le tube qui le porte est assez long pour intercepter la lumière des nuées, et des diaphragmes limitent le champ, pour éviter l'*aberration de sphéricité*, que l'on diminue encore, en employant deux lentilles donnant le même foyer qu'une seule plus convergente (1993). Le système des deux lentilles permet aussi de faire varier la distance de l'image sans déplacer l'objet, en rapprochant ou éloignant l'une de l'autre les lentilles, qui sont fixées à deux tubes qui peuvent s'enfoncer l'un dans l'autre (1989). Enfin, ces lentilles sont *achromatiques*, c'est-à-dire disposées, suivant des règles que nous donnerons, de manière à ne pas produire les couleurs qui accompagnent ordinairement la réfraction.

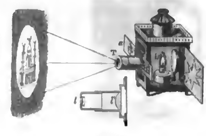


Fig. 1515.

L'invention du mégascope date de la fin du siècle dernier. Il a été perfectionné par Charles, qui passe, à cause de cela, pour en être l'inventeur. Cet appareil a rendu plus d'un service aux arts, à l'industrie, à l'histoire naturelle; mais la découverte de la photographie en a restreint beaucoup l'usage.

1997. Lanterne magique. — La *lanterne magique* (*fig.* 1515), imaginée par le P. Kirker, n'est autre chose qu'un mégascope, où la lumière solaire est remplacée par celle d'une lampe à réflecteur L, renfermée dans une caisse ou lanterne complétement fermée. Les dessins dont on veut projeter l'image sur un écran, sont peints avec des couleurs translucides, sur une lame de verre *a* que l'on fait glisser entre la lampe et un système de deux lentilles convergentes ajustées dans le tube T, et dont on voit la coupe en *l*, *l'*. L'une, *l'*, dite *demi-boule*, est plan-convexe; l'autre, plus petite, *l* se nomme l'ob-

jectif. On renverse le dessin pour que son image soit droite. Comme ce dessin est très près de la demi-boule, si l'on en rapproche l'objectif, il faut éloigner l'instrument de l'écran, pour que l'image continue à s'y peindre nettement (1989) ; en même temps, cette image grandit. Comme le dessin n'est pas très fortement éclairé, on ne peut guère dépasser un grossissement de 20 à 25 fois en diamètre.

Dissolving-Views. — On nomme ainsi, une application assez récente de la lanterne magique, qui consiste à faire succéder sur un même écran, à une image dont l'éclat diminue graduellement, une autre image dont l'éclat, d'abord très faible, augmente peu à peu. Pour cela, on a deux lanternes magiques identiques, placées de manière à projeter leurs images sur un même écran translucide, que l'on regarde du côté opposé. Les peintures, représentant des monuments, des sites... sont éclairées par la lumière Drummond (II, 1058). L'oxygène et l'hydrogène arrivent par des tubes séparés, au bec qui les projette enflammés, sur le morceau de chaux. On ferme peu à peu le passage de l'oxygène, quand on veut diminuer l'éclat d'une image ; pendant qu'on augmente l'éclat de l'autre, en ouvrant le robinet par lequel arrive l'oxygène dans l'appareil qui la produit.

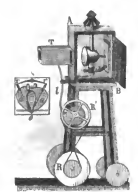


Fig. 1516.

1998. Fantasmagorie. Les illusions de la fantasmagorie sont produites au moyen d'un appareil nommé *Fantascope*, analogue à la lanterne magique. Le Fantascope consiste en une caisse de bois AB (*fig.* 1516) exactement fermée, contenant une lampe à réflecteur, et portant un tuyau T, dans lequel sont disposées deux lentilles convergentes : une demi-boule fixe, et un objectif mobile. Les peintures translucides se détachent sur un fond opaque, de manière que l'écran ne reçoit pas de lumière en dehors de l'image. L'appareil est placé dans une chambre séparée de celle qu'occupent les spectateurs, par un écran translucide, ordinairement en percale, sur lequel on projette les images. Les spectateurs, plongés dans une obscurité complète, n'ont aucun moyen de juger de la distance à laquelle ils se trouvent de ces images. Il en résulte que, si l'on fait en sorte que celles-ci grandissent rapidement, les spectateurs s'imaginent qu'elles se précipitent sur eux ; si, au contraire, on en diminue les dimensions, elles leur semblent s'éloigner. Pour produire ces effets, il suffit de changer la distance de l'appareil à l'écran, en ayant soin de faire varier en même temps l'intervalle des deux lentilles, de manière que l'image se fasse toujours exactement sur l'écran. Pour cela, la lanterne est fixée sur un chariot, dont une des roues porte une poulie R qui communique son mouvement, au moyen d'une corde sans fin, à un excentrique R′ sur lequel s'appuie l'extrémité du levier *l*. Ce levier fait mouvoir l'objectif, de manière à le rapprocher de la demi-boule

quand le chariot roule en s'éloignant de l'écran, et réciproquement. L'excentrique est taillé de façon que le système des lentilles donne toujours l'image focale sur l'écran. Pour rendre l'illusion plus complète, deux diaphragmes *a*, *a*, articulés en *o* comme des branches de ciseaux, interceptent une partie d'autant plus grande des faisceaux lumineux, que l'objectif est plus éloigné de la demi-boule, de manière que l'image diminue d'éclat en même temps que de grandeur. Les diaphragmes *a*, *a* se rapprochent ou s'écartent, par le mouvement même de l'objectif : deux cordons sont attachés à leurs extrémités libres *a*, *a* ; aux points d'attache sont articulées de petites bielles liées par leur partie supérieure aux extrémités d'un double ressort *rr*. Les deux cordons passent librement par un trou *o* pratiqué dans le cadre qui supporte l'objectif, et vont s'attacher en un même point fixe, près de la demi-boule. Quand l'objectif s'écarte de cette dernière, les cordons se tendent, les branches du ressort *rr* s'abaissent, et les diaphragmes se rapprochent; quand l'objectif s'éloigne, le ressort se redresse et les diaphragmes s'écartent.

La fantasmagorie a été introduite en France en 1798, par Roberston, son inventeur. Le soin qu'il apportait à écarter toute lumière étrangère, et à éviter le bruit que pourrait occasionner la manœuvre de l'appareil, dont les roues étaient garnies d'étoffe ; la perfection des peintures, représentant le plus souvent des sujets effrayants, tout concourait à rendre l'illusion complète. Souvent les apparitions étaient accompagnées de bruits étranges, imitant le tonnerre, la pluie, le cri d'animaux nocturnes.... Les représentations de Roberston eurent un grand retentissement, et les physiciens furent longtemps avant de découvrir la cause de l'illusion par laquelle l'image semble s'approcher ou s'éloigner. On a prétendu que les prêtres de l'antiquité se servaient d'artifices analogues à ceux de la fantasmagorie, pour éprouver les initiés aux mystères d'Isis et de Cérès, et pour produire divers prestiges. Il semble résulter de la découverte d'une espèce de lanterne magique dans les ruines d'Herculanum, et de celle d'une lentille de verre trouvée par Ficoroni dans un très ancien tombeau romain, que cette opinion n'est pas dénuée de toute vraisemblance.

1999. Microscope solaire. — Le microscope solaire, inventé à Berlin, vers 1743, par Leiberkuyn, est destiné à montrer, avec un énorme grossissement, les images d'objets extrêmement petits. Il est fondé sur les mêmes principes que le mégascope. L'image étant fortement grossie, il faut, pour qu'elle ne soit pas trop obscure, que l'objet soit très vivement éclairé. C'est à quoi l'on parvient en concentrant sur lui les rayons du soleil au moyen de lentilles. La figure 1517 représente en *m*R une coupe de l'instrument, et en *m*'R' une vue générale. Les mêmes lettres indiquent les mêmes objets sur les deux dessins. Les rayons solaires sont renvoyés horizontalement sur une lentille L, par un miroir mobile comme celui du porte lumière (1918). Après avoir traversé la lentille L, ils sont reçus par une seconde lentille *c*, que l'on peut déplacer au moyen d'une crémaillère et d'un pignon denté, de manière à amener sur l'objet l'image très petite et très éclatante du soleil, en formant

ainsi ce qu'on nomme un *focus*. L'objet est fixé sur une lame de verre *v* maintenue entre deux plaques trouées *p*, *p'*, que des ressorts *rr* serrent l'une contre l'autre. Les rayons lancés par l'objet très éclairé, traversent une lentille à court foyer *o* nommée *objectif*, qui forme, à une grande distance, une image renversée, et d'autant plus grossie que l'objet est plus près du foyer de l'objectif. Cet objectif est représenté à part en O avec sa grandeur réelle ; C est la lentille qui concentre sur l'objet $\alpha\beta$, l'image solaire, d'autant plus brillante qu'elle est plus petite. Une crémaillère et un pignon denté *a*, *a*, permettent de déplacer l'objectif jusqu'à ce que l'image se fasse nettement sur l'écran.

On voit que l'objet est éclairé par derrière, mais les corps très petits étant ordinairement translucides, cela n'a pas d'inconvénient. Æpinus a disposé

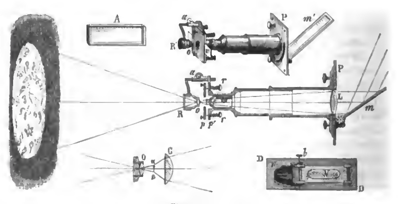


Fig. 1517.

l'instrument de manière à éclairer les objets par devant ; l'image focale du soleil est projetée sur leur partie antérieure, par un petit miroir plan incliné convenablement ; l'objectif se trouve alors, ainsi que l'objet, au-dessous de l'axe de la partie de l'appareil qui forme le focus.

Pour mesurer le grossissement par l'expérience, on remplace l'objet par une lame de verre sur laquelle est gravée une division en centièmes de millimètres. Les traits se peignent sur l'écran ; on mesure leur distance, et on la compare à celle de deux traits de la lame de verre. Si, par exemple, la distance de deux traits de l'image est de 100 millimètres, le grossissement sera de 10,000 en diamètre. On peut visser en *o* différents objectifs, pour obtenir divers grossissements sans déplacer l'écran.

Le microscope solaire est souvent employé pour montrer à une nombreuse assemblée les détails de l'organisation de très petits animaux, la structure des tissus des plantes, les animaux infusoires contenus dans certains liquides en fermentation ; on dépose une goutte du liquide sur une lame de verre qu'on

glisse entre les plaques *p*, *p'*, ou dans une auge très étroite en verre A. Quand on veut observer les infusoires d'une eau stagnante, on fait passer une grande quantité de ce liquide à travers un filtre de papier ; la goutte prise ensuite sur ce filtre en contient un grand nombre. — Une expérience très curieuse est celle de la cristallisation d'un sel, particulièrement du *sel ammoniac* ; on met une goutte de la dissolution sur une lame de verre qu'on engage entre les deux lames *p*, *p'*. L'évaporation est activée par la chaleur qui règne au focus, et l'on voit bientôt se former des points sombres, d'où partent, comme des fusées, des bandes délicatement découpées en feuilles de fougère, s'allongeant à vue d'œil, et s'entrecroisant dans tous les sens de manière à couvrir rapidement tout le champ. — La circulation du sang dans la membrane qui réunit les doigts de la patte d'une grenouille, ou dans celle qui borde la queue du têtard, est aussi très curieuse à observer. On voit en DD (*fig.* 1517) le petit appareil au moyen duquel on retient le têtard : la partie antérieure du corps de l'animal est emprisonnée dans une calotte à jours *n*, articulée en *b* avec une lame de verre V; on soulève la lame et la calotte, de manière à pouvoir placer le petit animal entre eux et la plaque DD, qui porte une ouverture, devant laquelle doit se trouver une partie membraneuse.

La chaleur accumulée au focus présente souvent des inconvénients. On l'amortit au moyen de certains verres colorés en vert, qui sont très peu diathermanes, ou au moyen d'une couche d'eau, ou mieux d'une dissolution d'alun, contenue dans une auge très étroite A, que l'on place entre l'objet et la lentille c. Quand les objets à observer sont par trop petits, M. Dubosq fixe leur image, modérément grossie par le microscope solaire, sur une lame de verre, par un procédé photographique, et ce dessin est ensuite porté dans le microscope solaire, qui en donne une image amplifiée. Le grossissement de cette image par rapport à l'objet lui-même, est égal au produit des deux grossissements successifs.

Microscope à gaz. — M. Galy-Cazalat, en éclairant l'objet au moyen de la lumière Drummond (II, 1058), a créé le microscope à gaz, qui ne diffère que par ce mode d'éclairage, du microscope solaire. Le cylindre de chaux, qui reçoit la chaleur du mélange gazeux, est renfermé dans une caisse entièrement fermée. Les deux gaz sont contenus dans des sacs en caoutchouc, et ne se mêlent que tout près de l'orifice de sortie, afin d'éloigner les chances d'explosion. Les rayons divergents qui partent de la chaux, sont rendus convergents par une lentille, et forment un *focus* tellement brillant, qu'on peut obtenir un très fort grossissement. Mais pour que l'image soit nette, il faut employer un objectif *achromatique*.

2000. Microscope photo-électrique. — MM. Donné et Foucault ont imaginé d'employer, pour éclairer l'objet, la lumière de l'arc voltaïque (III, 1531). A l'appareil régulateur qu'ils ont employé d'abord, on préfère généralement aujourd'hui le régulateur de M. Duboscq. Les charbons *c*, c (*fig.* 1518) sont renfermés dans une caisse cubique AB munie d'une lentille

plan-convexe *l*, qui rassemble les rayons lumineux en un faisceau parallèle. Un réflecteur sphérique en verre *r*, renvoie sur la lentille ceux de ces rayons qui sont lancés du côté opposé. Le microscope solaire se visse en *ab*.

Lampe photo-électrique. — L'appareil de la figure 1518, nommé *lampe photo-électrique* ou *lampe électro-dynamique*, est fréquemment employé aujourd'hui dans les cours d'optique ponr remplacer les rayons solaires. La lentille *l* peut se mouvoir de manière à donner à volonté, par de petits déplacements, des rayons parallèles divergents ou convergents. On adapte à l'ouverture *ab*, des diaphragmes présentant des ouvertures appropriées à chaque genre d'expérience.

Une des expériences les plus curieuses, consiste à projeter sur un écran l'image même des charbons I, I', en plaçant convenablement la lentille *l*, couvrant le réflecteur *r* d'un écran, et interceptant, au moyen d'un diaphragme, les rayons qui passent trop près des bords de la lentille. L'image est alors très nette, et l'on peut voir la forme que prennent les extrémités des charbons; celui qui apporte l'électricité positive s'usant en s'amincissant, l'autre, en se creusant en forme de coupe. On remarque en même temps les mouvements intermittents par lesquels ils se rapprochent, sous l'influence du régulateur. On distingue aussi le transport des particules ; on voit une espèce de poussière lumineuse qui se précipite du pôle positif au pôle négatif. Si l'on termine le charbon positif par une petite coupelle dans laquelle on mette successivement différents métaux, on observe le transport de leurs particules, qui donnent à l'arc voltaïque différentes couleurs. On remarque enfin, au moment où l'on ferme le circuit, que la lumière se manifeste d'abord au pôle négatif (III, 1537).

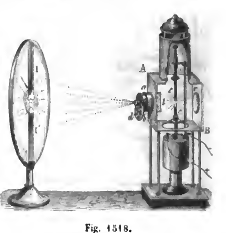


Fig. 1518.

Nous ferons connaître plus tard les applications des lentilles aux instruments grossissants qui viennent en aide à notre vue. Il nous reste, pour le moment, à parler de leur emploi dans la construction des phares.

2001. PHARES DIOPTRIQUES. — Fresnel a fait faire un immense progrès à l'éclairage des phares, en substituant aux miroirs paraboliques, dont nous avons indiqué divers inconvénients (1938), des systèmes de lentilles destinées à rendre parallèles les rayons émanant d'une flamme. La première difficulté consistait à construire des lentilles de grandes dimensions dépourvues d'aber-

ration de sphéricité, et assez minces pour qu'il n'y eût pas d'absorption sensible de lumière. Fresnel est parvenu à résoudre la question de la manière la plus satisfaisante, au moyen des *lentilles à échelons* ou *lentilles polyzonales* (II, 731). La courbure de la section de chacun des anneaux de verre qui composent ces lentilles est établie de manière qu'il n'y ait pas d'aberration de sphéricité ; c'est dire que les surfaces de ces anneaux n'appartiennent pas à des sphères concentriques.

Feux tournants. — La figure 1519 représente un *feu tournant* de premier ordre. Des panneaux *ll*, formés de portions rectangulaires de lentilles à échelons, sont disposés verticalement autour du centre lumineux, de manière à former un tambour prismatique dont l'axe passe par le foyer principal de chaque lentille. On peut ainsi, avec une seule lumière, lancer des faisceaux parallèles dans autant de directions que l'on veut, tandis qu'avec les miroirs paraboliques, il faut autant de lumières que de faisceaux.

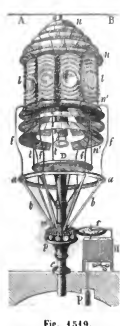


Fig. 1519.



Fig. 1520.

Indépendamment de cette partie de l'appareil, qui constitue le système dioptrique, il y a un système réflecteur destiné à renvoyer horizontalement les rayons dirigés trop haut ou trop bas pour tomber sur les lentilles. Ces rayons sont réfléchis par deux séries de couronnes de miroirs en verre étamé, *nn*, *n'n'*, échelonnées en jalousies, et soutenues par des tringles *t*, *t*, portées par un plateau D fixé à la colonne Dc. Chaque couronne est composée d'un grand nombre de pièces, dont les sections faites par des plans passant par l'axe de l'appareil, présentent la courbure d'une parabole à axe horizontal ayant son foyer au centre lumineux ; de manière que tous les rayons tombant sur une même section sont réfléchis horizontalement. Le système de lentilles est soutenu par des tringles *f*, *f*, *f*, *f*, extérieures aux couronnes inférieures, et fixées au cercle *aa*. Des consoles *b*, *b*, portées par un manchon *m* qui enveloppe l'arbre Dc, soutiennent le cercle *aa*. Le manchon s'appuie sur des galets qui lui permettent de tourner facilement en roulant sur une petite plate-forme *p* fixée à la colonne Dc. Le système des lentilles est maintenu, à sa partie supérieure,

par un tourillon *o* qui traverse la barre fixe AB, et il reçoit un mouvement de rotation régulier, d'un système d'horlogerie H dont la dernière roue *r* mène un disque denté adapté au manchon *m*. Il résulte de ce mouvement, que les divers faisceaux parallèles parcourent l'horizon, et viennent passer les uns après les autres par un même point, en y produisant une vive lumière ou un *éclat*, suivi d'une obscurité relative ou *éclipse*, quand le point considéré se trouve compris dans l'espace qui sépare deux faisceaux voisins; alors il ne reçoit que la lumière envoyée par le système réflecteur fixe. Le nombre d'éclats par minute, qui n'est pas le même pour les différents phares situés sur une même côte, sert à les distinguer les uns des autres.

Tout cet appareil est renfermé dans une cage L (*fig.* 1520), surmontée d'un toit en cuivre, et garnie de glaces épaisses de 8 à 10 millimètres, pour résister aux vents les plus violents, et aussi au choc des oiseaux de mer qui parfois se précipitent vers la lumière.

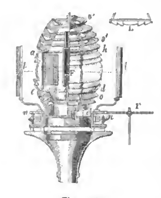


Fig. 1521.

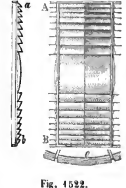


Fig. 1522.

Les miroirs étamés s'altérant assez rapidement, on a eu l'idée de les remplacer par des anneaux en verre, dans lesquels les rayons éprouvent la réflexion totale. Mais ce système, très coûteux, ne s'emploie guère que pour les appareils de petites dimensions, tels que celui que nous allons décrire.

2002. Feux fixes. — La figure 1521 représente un appareil, dit *feu de port*; une des moitiés est une coupe passant par l'axe, et l'autre une perspective. On y remarque d'abord une sorte de tambour *acdh* engendré par la section *ac* d'une lentille à échelons tournant autour d'une droite perpendiculaire à son axe et passant par son foyer principal F. Les rayons lumineux partant du point F traversent les parois du tambour et émergent horizontalement dans toutes les directions, en formant une nappe lumineuse d'épaisseur égale à *ac*. Les rayons qui passent par dessus et par dessous les bords du tambour, sont reçus par des anneaux de verre à section prismatique *oo*, *o'o'*, dans lesquels ils éprouvent la réflexion totale, de manière à être renvoyés dans la direction horizontale. Le côté réfléchissant de la section de chaque anneau n'est pas rectiligne, mais il forme un arc de parabole ayant son foyer en F. Tout cet appareil est fixe. Pour y produire des éclats, on fait tourner à l'extérieur deux lentilles cylindriques verticales à échelons *l*, *l*, dont on voit la coupe horizontale en L, qui rassemblent en faisceaux parallèles les rayons

divergents horizontaux qui viennent les traverser. Ces lentilles sont portées par une couronne dentée *nn* qui roule sur des galets, et est mise en mouvement par une roue *r* faisant partie d'une horloge. On varie aussi les feux, au moyen de verres rouges, fixes ou mobiles.

Dans les appareils à feux fixes de grandes dimensions, le foyer étant très long, les anneaux qui forment le tambour, ont une courbure trés faible, et seraient trés difficiles à travailler. Le tambour est alors formé de lentilles cylindriques AB, *ab* (*fig.* 1522), dont *c* est une coupe par un plan horizontal. On met 32 de ces lentilles, au lieu de 8 ou 10, comme dans les feux tournants. Les rayons ne sont déviés que dans les plans verticaux; ils forment donc une bande horizontale ayant pour épaisseur la hauteur AB, et illuminant tous les points de l'horizon.

2003. Becs multiples de Fresnel et Arago. — Le systéme lenticulaire imaginé par Fresnel n'aurait pu donner les magnifiques résultats que nous admirons, si on ne leur avait appliqué un systéme de lampe capable de fournir une lumiére extrêmement intense. Avec une lampe d'Argant ordinaire, les lentilles à échelons donnent des résultats bien inférieurs à ceux des miroirs paraboliques; ceux-ci, avec les dimensions qu'on leur donne ordinairement, sont frappés par les $\frac{7}{10}$ des rayons émanant de la flamme placée à leur foyer, et en réfléchissent à peu prés la moitié, soit $\frac{7}{20}$, en un faisceau paralléle. Les lentilles polygonales, soutendant ordinairement dans tous les sens un angle de 45° ayant son sommet au foyer, ne reçoivent que $\frac{1}{20}$ environ des rayons de ce foyer; le miroir parabolique donne donc un faisceau parallèle 6 à 7 fois plus intense que la lentille. Cela explique l'insuccès des essais de phares lenticulaires, faits en Angleterre. Fresnel et Arago ont résolu la question au moyen des becs à plusieurs mèches concentriques. Les avantages qu'offrent ces becs avaient été signalés par Rumfort; mais on ne savait pas en modérer la flamme. Fresnel et Arago ont levé la difficulté par la méthode de Carcel, qui consiste à faire circuler un excés d'huile dans la méche, de manière à éloigner la flamme du bec, et à empêcher l'huile d'y entrer en ébullition. Dans les phares de premier ordre, les becs sont à quatre mèches concentriques pouvant s'élever ou s'abaisser indépendamment les unes des autres, au moyen de pignons et de crémailléres. Une cheminée de verre enveloppe le tout; elle est surmontée d'un tuyau métallique qu'on peut allonger à volonté, et dans lequel se trouve un registre, qu'on peut incliner plus ou moins au moyen d'une vis de rappel, pour régler le tirage. Ces becs équivalent à 17 becs de lampe Carcel, et consomment 750 grammes d'huile par heure. Placés au foyer d'un panneau lenticulaire de 1 métre de hauteur et de 0^{m},76 de largeur, ils produisent des éclats qui, dans l'axe, équivalent à 4000 becs de Carcel, ou à 24000 bougies. L'huile est poussée dans le bec par des pompes que fait jouer un mouvement d'horlogerie, auquel on substitue aujourd'hui le système plus simple des lampes dites *à modérateur*. Une disposition ingénieuse avertit le gardien, quand l'écoulement de l'huile vient à s'interrompre : l'huile en excés

tombe dans un vase suspendu à un levier et percé d'un trou assez petit pour que le vase reste toujours plein. Si l'écoulement cesse, le vase se vide, il est soulevé par un contrepoids, et le mouvement du levier dégage une sonnerie qui avertit le gardien.

2004. De la portée des phares. — La portée d'un phare est la distance maximum de laquelle on peut l'apercevoir. Cette portée dépend de deux conditions : l'intensité de la lumière, et la hauteur au-dessus du niveau de la mer, à cause de la courbure du globe. C'est pourquoi les feux à grande portée sont placés autant que possible sur des hauteurs, et l'appareil est installé sur une haute tour (*fig.* 1520). Pour que le système éclairant d'un phare donne des résultats satisfaisants, il faut qu'il puisse être vu pendant la nuit, jusqu'aux limites de son horizon, quand l'air présente une transparence moyenne. Le tableau suivant indique la portée ordinaire des feux de différents ordres.

ORDRE DES FEUX.	DIAMÈTRE DU TAMBOUR dioptrique.	NOMBRE DES MÈCHES.	COMBUSTION D'HUILE par heure.	PORTÉE DES FEUX.
1er ordre.......	1m 84	4	750gr	15 à 10 lieues.
2e ordre........	1, 40	3	500	10 à 7
3e { grand modèle.	1	2	190	7 à 5
3e { petit modèle..	0, 50	2	120	
4e { grand modèle.	0, 375	1	60	6 à 3
4e { petit modèle..	0, 30	1	45	

Les phares lenticulaires sont une des plus importantes applications de la dioptrique, et auraient suffi pour immortaliser Fresnel ; aussi ont-ils été promptement adoptés par tous les pays maritimes. La France, qui est le pays dont les côtes sont le mieux éclairées, n'emploie plus de miroirs paraboliques que pour quelques fanaux destinés à faciliter l'entrée des ports. Depuis les perfectionnements apportés par MM. Soleil et Lepaute à la construction des appareils, l'étranger vient souvent demander aux ateliers français les systèmes dioptriques dont il a besoin. Un appareil pour phare de premier ordre revient à 30,000 francs environ, et le mètre carré de panneau lenticulaire en verre très pur de Choisy-le-Roi, à 1,750 francs.

Rappelons, en terminant, qu'on a commencé à éclairer les phares au moyen de l'*arc voltaïque*, fourni par un appareil d'induction magnéto-électrique, mu par la vapeur (III, 1732) et l'on a ainsi beaucoup augmenté leur portée.

§ 4. — MESURE DES INDICES DE RÉFRACTION.

I. Indices de réfraction des solides et des liquides.

2005. Dans les formules relatives à la réfraction, entre constamment l'indice n. Si donc on veut appliquer ces formules, il faut connaître dans les différents cas la valeur de n. De plus, l'indice de réfraction forme un caractère important en chimie et en minéralogie, où il sert à distinguer certaines substances les unes des autres. C'est pourquoi beaucoup de physiciens se sont appliqués à inventer et à perfectionner des méthodes pour obtenir cette valeur avec précision ; nous allons faire connaître ces méthodes, en commençant par celles qui s'appliquent aux corps solides et liquides.

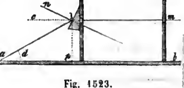


Fig. 1523.

Descartes est le premier qui ait mesuré les indices de réfraction des corps solides; il formait un prisme avec la substance, en mesurait l'angle, et l'appliquait, dans une position horizontale, contre une règle verticale percée d'un petit trou (*fig.* 1523). Il faisait arriver un pinceau horizontal de rayons solaires ml, par ce trou et par un autre trou m percé dans une seconde règle, à la même hauteur au-dessus d'une table de marbre ab qui supportait tout l'appareil. Le rayon, entrant perpendiculairement dans le prisme, n'éprouvait de déviation qu'à sa sortie, et rencontrait la table en un point a, dont on mesurait la distance au point p. De cette distance et de la hauteur lp, on concluait la valeur de l'angle d, égal à la déviation cla. Or, on a $cla = nla - nlc = i - a$, a étant l'angle au sommet du prisme ; d'où $i = d + a$. L'angle nlc, ou r, est égal à a, puisque c'est l'angle des normales aux deux faces ; l'indice n est donc donné par l'égalité $\sin(d+a) = n \sin a$. Ce moyen n'est pas très bon, la mesure des longueurs n'étant pas susceptible d'une aussi grande précision que celle des angles.

Remarquons que dans cette méthode, comme dans celles qui suivent, on mesure l'indice de réfraction relatif, de l'air et de la substance du prisme ; mais l'indice absolu de l'air est tellement faible, que les résultats ne diffèrent pas sensiblement de ceux que l'on obtiendrait si le prisme était dans le vide.

2006. Méthode de Newton. — Descartes, en employant un rayon normal à l'une des faces, faisait en sorte de n'avoir à mesurer qu'un seul angle d'incidence et qu'un seul angle de réfraction. Newton est arrivé au même résultat en cherchant la déviation minimum. On a en général, pour la valeur de la déviation, $D = i + e - a$; i et e étant les angles d'incidence et d'émergence (1971). Dans le cas du minimum, e est égal à i, et il vient $d = 2i - a$; d'où

$i = \frac{1}{2}(d+a)$. De plus, les angles du rayon réfracté avec les normales étant alors égaux, et leur somme étant égale à a, chacun d'eux est égal à $\frac{1}{2}a$. On a donc pour la valeur de l'indice, $n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \frac{1}{2}(d+a)}{\sin \frac{1}{2}a}$. Il nous reste à voir comment on mesure avec précision la valeur de d.

Mesure de la déviation minimum. — Après avoir mesuré l'angle a du prisme (*fig.* 1524) par une des méthodes que nous avons indiquées (1916), on installe ce prisme verticalement sur un support mobile autour d'un axe vertical, on vise avec la lunette d'un cercle répétiteur o, une mire très éloignée, d'abord directement, suivant om', puis à travers le prisme, suivant onm, et l'on fait tourner ce prisme sur son support, jusqu'à ce que l'angle $m''om'$ que font entre elles les deux directions successives de la lunette, soit le plus petit possible. Cet angle est alors égal à la déviation minimum $m''cm$, si l'on suppose que la mire est assez éloignée pour que les rayons mn, $m'o$ qui en émanent soient parallèles. On prend souvent pour mire, la tige d'un paratonnerre très éloigné, ou bien une fente pratiquée dans le volet d'une chambre noire, et par laquelle on fait entrer les rayons solaires. Quand on opère pendant la nuit, on emploie une lampe enveloppée d'un manchon en tôle présentant une fente verticale.

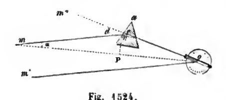


Fig. 1524.

Dans ce dernier cas, la mire n'est pas ordinairement assez éloignée pour qu'on puisse regarder les rayons om' et nm comme parallèles. Il faut alors tenir compte de l'angle qu'ils font entre eux. Soit m la mire, α cet angle, et o l'angle $m''om$. La somme des angles du triangle mco étant égale à 180°, on a

$$180° = \alpha + o + (180° - m''cm) = \alpha + o + 180° - (2i - a);$$

d'où $i = \frac{1}{2}(a + o + \alpha)$, et par conséquent la valeur de n devient

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(a + o + \alpha)}{\sin \frac{1}{2}a}.$$

Pour mesurer α, on peut transporter le cercle répétiteur en m. Mais comme α est très petit, on se contente ordinairement de mesurer la longueur de la perpendiculaire nP, puis la distance mP, et l'on a tang $\alpha = n\text{P} : m\text{P}$. Pour faire cela commodément, on tend un cordon de o en m.

2007. Appareils spéciaux. — Fraunhofer a employé, dans ses recherches sur les indices de réfraction, un appareil qui donne la déviation minimum avec une grande précision. Cet appareil (*fig.* 1525) n'est autre chose qu'un théodolite modifié. AB est un cercle divisé horizontal, au centre duquel tourne une lunette

horizontale L, à l'extrémité de laquelle est fixé un système de pièces destinées à porter le prisme, et auxquelles un contre-poids, *a*, fait équilibre. Le prisme est posé sur une plaque *p* soutenue par trois vis calantes *v*, que porte une seconde plaque *p'*. Une tige joint ces deux plaques ; fixée à *p'*, elle s'enfonce dans une cavité de la plaque *p*, de manière que celle-ci puisse obéir aux mouvements des vis, quand on veut la mettre de niveau. Une potence fixée à la plaque *p'* porte une vis verticale *u*, avec laquelle on maintient le prisme sur la plaque *p*. Le système des deux plaques peut tourner autour d'un axe vertical. — Après avoir visé une mire éloignée, et observé la position exacte de la lunette sur le cercle, on installe le prisme sur le support *pp'*, de manière que ses arêtes soient bien verticales. On vise ensuite la mire, à travers le prisme, et l'on fait tourner la lunette dans un plan horizontal, et les plaques *pp'* autour de leur centre, de manière que le fil focal de la lunette coïncide toujours avec l'image de la mire, et l'on s'arrête quand la lunette fait le plus petit angle possible avec sa position primitive. La quantité angulaire dont elle a tourné représente la déviation minimum. *l* est une petite lampe destinée à éclairer obliquement le réticule dans le cas où la mire a un faible éclat, et L' une lunette pointée sur la mire et destinée à reconnaître si l'appareil ne s'est pas dérangé pendant l'expérience.

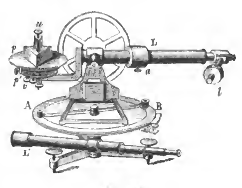


Fig. 1525.

M. l'abbé Dutiron, dans un grand travail sur lequel nous reviendrons dans le chapitre suivant, mesurait la déviation, au moyen d'un appareil très précis construit par M. Brunner, et qui n'est autre chose que le goniomètre de M. Babinet (1915), dont le collimateur fixe a été enlevé et remplacé par une mire éloignée. Le prisme est installé, au centre du cercle gradué, sur des plaques disposées comme celles de l'appareil précédent (*fig.* 1525).

Enfin, le goniomètre de Malus, et surtout celui de M. Babinet, peuvent aussi servir à mesurer la déviation minimum, comme nous l'avons expliqué (1975). Avec ce dernier instrument, on ne se trompe pas de 1 minute. Or, d'après M. H. Deville, une erreur de 1 à 2 minutes, avec un prisme de 50° degrés de substance moyennement réfringente, n'influe que sur le 4e chiffre décimal de la valeur de l'indice.

2008. Coloration des mires. — Quand on observe une mire à travers le prisme, particulièrement quand cette mire est formée d'un trait lumineux, elle paraît notablement élargie et colorée de nuances brillantes disposées les

unes à côté des autres. Ce phénomène, connu sous le nom de *dispersion*, rend incertaine la coïncidence de la mire avec le fil de la lunette. On pourrait faire disparaître l'épanouissement et la coloration de la mire, en interposant un verre coloré ; mais alors elle perdrait beaucoup de son éclat. On préfère généralement viser une couleur en particulier, et l'on a soin de noter à quelle couleur se rapporte l'indice mesuré. Ordinairement on vise la couleur jaune, qui est placée vers le milieu, et qui présente le plus d'éclat. En agissant ainsi, il reste encore de l'incertitude quand on veut obtenir une grande précision ; les couleurs n'étant pas nettement séparées, et les bords de la bande colorée étant eux-mêmes diffus. On n'est donc pas sûr, dans deux expériences différentes, de viser au même point l'image. La difficulté a été levée par une découverte de Fraunhofer, qui remarqua dans l'image étalée, des raies extrêmement fines parallèles aux bandes colorées, et toujours disposées de la même manière dans chaque couleur, quelle que soit la substance du prisme, pourvu que la lumière qui le traverse provienne de la même source. Il suffira donc d'adopter une de ces raies dans la couleur que l'on vise.

M. H. Deville, dans des expérience faites avec le goniomètre de M. Babinet, a trouvé moyen d'obtenir un repère très net sans avoir recours à ces raies. Il remplace le fil vertical du collimateur par une aiguille à coudre dont les deux bords forment des bandes colorées ; ces bandes se superposent dans la partie la plus fine de l'aiguille, en donnant un trait net formé par la ligne de séparation de deux couleurs tranchées, un vert bleuâtre et un rose intense.

209. Mesure de l'indice de réfraction d'un milieu terminé par deux plans parallèles. — Il est souvent utile de prendre l'indice de réfraction d'un corps qui a la forme d'une plaque. Le duc de Chaulnes a donné pour cela une méthode dont nous parlerons en traitant du microscope ; M. F. Bernard a résolu la question au moyen du goniomètre de M. Babinet modifié [1]. La lunette mobile, au lieu de tourner autour du centre de l'instrument, peut être déplacée parallèlement à elle-même, au moyen d'une vis de rappel à tête micrométrique. La lame, fixée sur le support central de l'instrument, est d'abord placée perpendiculairement à l'axe du collimateur fixe, dont on fait coïncider les fils verticaux avec ceux de la lunette mobile. On fait ensuite tourner la plaque, d'une quantité angulaire i mesurée au moyen de l'alidade qui la porte ; la coïncidence n'existe plus, à cause du déplacement latéral d qu'éprouvent les rayons, et l'on mesure ce déplacement, en ramenant la coïncidence, au moyen de la vis micrométrique. Ce déplacement, d, est lié à l'indice de réfraction, à l'épaisseur e, et à l'angle d'incidence i, par une formule que nous avons fait connaître (1965), de laquelle on tire $n = \sin i \sqrt{1 + \left(\frac{e \cos i}{e \sin i - d}\right)^2}$

— Pour plus d'exactitude, au lieu de mesurer simplement d, on tourne

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXIX, p. 27 ; et t. XLVIII, p. 120.

l'alidade d'une même quantité angulaire en sens opposé, et l'on mesure la distance $2d$ qui correspond aux deux positions symétriques de la plaque.

M. Pichot a appliqué cette méthode aux liquides placés dans une auge étroite à faces bien parallèles. Dans l'appareil qu'il a employé et qu'il nomme *réfractomètre*, c'est le collimateur, qui se meut parallèlement à lui-même. Il a aussi simplifié le calcul, en se servant de formules de Kepler. La lunette à laquelle on applique l'œil peut se mouvoir suivant son axe, au moyen d'une vis micrométrique, ce qui permet d'appliquer la méthode du duc de Chaulnes.

2010. Application de la méthode de Newton aux liquides. — Les liquides sont renfermés dans le *prisme-flacon* (*fig.* 1526), qui consiste en un prisme de verre percé transversalement d'un ou plusieurs trous *o*, *o'* fermés par des lames minces en verre appliquées sur les faces du prisme. Un petit canal *c*, *c'*, perpendiculaire à la base du prisme, sert à introduire le liquide, qui prend ainsi la forme d'un prisme, dont on mesure l'angle par la méthode de réflexion (1916), et auquel on applique la méthode de Newton.

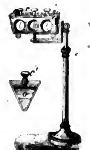


Fig. 1526.

Il est essentiel que les lames de verre qui limitent la masse liquide aient leurs faces bien parallèles. On choisit une lame mince travaillée avec soin, et l'on cherche les parties où les faces sont le plus exactement parallèles. Pour cela, on observe les deux images d'une bougie, réfléchies sur les deux faces, pendant que l'on fait tourner la lame sur elle-même ; si, pendant le mouvement, les deux images restent constamment parallèles, c'est que les faces sont elles-mêmes bien parallèles dans la région où se fait la réflexion. On partage alors la lame en deux par un trait de diamant traversant cette région, et l'on applique les deux fragments sur les faces du prisme, en ayant soin, pour plus de sûreté, de mettre le bord coupé, du côté du sommet sur l'une des faces, et du côté de la base, sur l'autre, de manière que, si la lame est un peu prismatique, les déviations produites par les deux fragments s'entre-détruisent.

Malgré toutes les précautions, les lames produisent presque toujours une petite déviation. Pour en tenir compte, on vise la mire directement, puis, après avoir interposé le prisme-flacon vide, dans la position qui correspond au minimum de déviation. Le fil de la lunette s'écarte alors sensiblement de la mire ; on rétablit la coïncidence, et le déplacement qu'il faut faire subir à la lunette, mesure la déviation produite par les lames. Cette déviation doit être ajoutée à celle que produit le prisme liquide, ou en être retranchée, suivant qu'elle est de sens contraire ou de même sens.

Nous verrons (2014) que les liquides étant très dilatables, les variations de température, même comprises entre les limites de celles de l'atmosphère, modifient sensiblement leur indice. Il faut donc opérer à une température bien constante, agiter vivement le liquide avant d'observer, pour qu'il soit bien

homogène, et éviter d'employer les rayons solaires qui, en le traversant, l'échaufferaient inégalement.

2011. Méthodes par la réflexion totale. — Quand on n'a que très peu de liquide, on emploie des méthodes particulières, parmi lesquelles se distingue celle dans laquelle on fait usage de la réflexion totale. Cette méthode, employée sous diverses formes par plusieurs physiciens, présente l'avantage de s'appliquer aux corps peu transparents et aux substances pâteuses, comme les couches du cristallin de l'œil.

Considérons d'abord un prisme rectangulaire (*fig.* 1527) dont on connaît l'indice de réfraction n, posé sur une règle horizontale LL; on fait adhérer sous sa face inférieure une goutte du liquide, qui doit être moins réfringent que la substance du prisme; une cavité pratiquée dans la règle donne place à cette goutte On vise cette goutte à travers le prisme, au moyen d'une lunette l

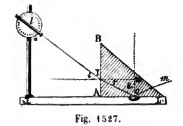


Fig. 1527.

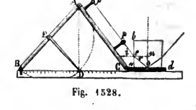


Fig. 1528.

mobile au centre d'un cercle vertical gradué pouvant se placer à différentes hauteurs sur une règle verticale Ll fixée à la table. La lunette étant d'abord assez élevée, on voit à travers la goutte liquide les objets qui sont au-dessous; mais si l'on abaisse peu à peu le cercle gradué, l'angle Ion va en augmentant, et bientôt on reçoit par réflexion totale en o, les rayons venant du côté m. On fixe alors la lunette, et l'on mesure l'angle α. Le moment où la réflexion totale commence se reconnaît avec précision quand il y a en m une lumière vive, comme celle des nuées; la surface de la goutte prend aussitôt un grand éclat, qui contraste avec la teinte sombre qu'elle avait auparavant. L'angle nol est alors égal à l'angle limite θ, et l'on a $\sin\theta = \frac{n'}{n}$; n étant l'indice de réfraction du prisme, et n' celui du liquide. Pour évaluer sin. θ, remarquons que θ est le complément de l'angle r. Or, $\sin i = \cos\alpha = n \sin r = n\cos\theta$; d'où $\cos\theta = \frac{\cos\alpha}{n}$, et $\sin\theta = \frac{1}{n}\sqrt{n^2-\cos^2\alpha} = \frac{n'}{n}$; d'où l'on tire $n' = \sqrt{n^2-\cos^2\alpha}$.

Wollaston évite les calculs de la manière suivante [1]. Le prisme, dont l'angle

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts), t. XXVI, p. 219.

bad est droit (*fig.* 1528), est posé sur une tablette *ad* qui peut glisser sur une règle B*d*, et porte une cavité *o* dans laquelle se loge la goutte liquide. Deux autres règles BA, AC, articulées en A, sont, en outre, articulées, l'une AB en un point fixe B, l'autre en C à la tablette C*d*, de manière que si l'on fait varier les angles A et B, cette tablette glisse sur BC. Le rapport des longueurs BA et AC est égal à l'indice de réfraction *n* de la substance du prisme; si donc un rayon entre en *c* parallèlement à AC, c'est-à-dire en faisant un angle d'incidence égal à C, l'angle de réfraction *r* est égal à l'angle B, puisque le triangle BAC donne BA : AC $= n =$ sin C : sin B. Ce rayon, parallèle à AC, s'obtient au moyen de deux pinnules *p*, *p*, à travers lesquelles on vise la goutte liquide *o*; et l'on fait mouvoir la règle AC jusqu'au moment où commence la réflexion totale. On a alors, dans le triangle rectangle *con*, $cn = co \sin \theta$. Mais, si l'on abaisse AD perpendiculaire à B*d*, les triangles rectangles ABD et *con* sont semblables, l'angle B étant égal à *nco*; on a donc AB : BD $= co : cn$, et par conséquent $\sin \theta = \frac{cn}{co} = \frac{BD}{AB} = \frac{n'}{n}$. AB étant connu une fois pour toutes, il suffit donc, pour obtenir n', de mesurer BD. Pour cela, la règle AB porte en son milieu une aiguille ED articulée en E, et ayant pour longueur $\frac{1}{2}$ AB. Cette aiguille appuiera toujours son extrémité libre au pied de la perpendiculaire AD; car elle représente le rayon d'une circonférence ayant son centre en E et passant par les points A et B, et quel que soit le point où l'extrémité D touchera la ligne B*d*, l'angle BDA sera droit. Une division tracée sur la barre donne alors la distance BD. Cette méthode n'est pas très précise, mais elle est expéditive et permet de suivre les changements qu'éprouve l'indice d'un liquide dont la température varie.

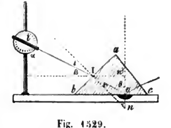


Fig. 1529.

Pour qu'il y ait réflexion totale, il faut que le liquide soit moins réfringent que la substance du prisme; c'est ce qui a lieu ordinairement quand ce dernier est en flint-glass. On peut, du reste, obtenir du verre très réfringent, en y mêlant, quand il est en fusion, de grandes quantités d'oxyde de plomb ou de borate d'oxyde de plomb.

Procédé de Malus. — La difficulté de faire l'angle du prisme exactement égal à 90°, a conduit à se passer de cette condition. Malus a opéré avec un prisme à angle aigu quelconque *abc* (*fig.* 1529). L'expérience se fait toujours en cherchant avec la lunette *l*, la position pour laquelle commence la réflexion totale. L'angle $\beta = 90° - \alpha$ étant connu, il suffit d'en déduire la valeur de l'angle $n'oI = \theta$, puisqu'on a $n \sin \theta = n'$. Or, si nous prolongeons la normale *in* jusqu'à sa rencontre avec la normale *nn'*, l'angle *n* est égal à l'angle I*bc* du prisme; et si nous désignons cet angle par *a*, le triangle I*no* donne

$\theta = r + a$, d'où $\sin\theta = \frac{n'}{n} = \sin(r+a) = \sin r \cos a + \sin a \cos r.$

Pour évaluer $\sin r$ et $\cos r$, on a $n \sin r = \sin i$, et le triangle $In'n$ donne $n'In = i + \beta = 90° - a$; d'où $i = 90° - a - \beta$; donc,

$$\sin r = \frac{1}{n}\sin(90° - a - \beta) = \frac{1}{n}\cos(a+\beta),$$

$$\text{et} \qquad \cos r = \sqrt{1-\sin^2 r} = \frac{1}{n}\sqrt{n^2 - \cos^2(a+\beta)}.$$

Portant les valeurs de $\sin r$ et $\cos r$ dans celle de $n' : n$, on en tire $n' = n\sin\theta = \cos(a+\beta)\cos a + \sin a\sqrt{n^2 - \cos^2(a+\beta)}$.

2012. Application de la méthode de la réflexion totale aux solides. — Si l'on pouvait appliquer un corps solide exactement sur la face du prisme, on pourrait trouver l'indice de réfraction de ce corps, par la méthode de la réflexion totale. Or, cela a lieu pour les corps mous, comme la cire, les substances organiques gélatineuses. Quand le corps solide est dur, on l'applique sur le prisme par une face plane; mais comme on ne peut empêcher l'interposition d'une couche d'air, on chasse cet air au moyen d'un liquide *plus réfringent* que le prisme, qui n'empêche pas la réflexion totale de se faire sur le corps solide. Ce moyen est précieux pour les corps que l'on n'a qu'en petits fragments, comme certains cristaux.

On peut aussi, par cette méthode, prendre l'indice de la substance du prisme; il suffit alors de ne pas mettre de liquide sur la face inférieure. La formule précédente, dans laquelle on fait $n' = 1$, donne alors

$$n = \frac{1}{\sin a}\sqrt{1 + \cos^2(a+\beta) - 2\cos a\cos(a+\beta)}.$$

On serait tenté d'employer un prisme à angle droit, en faisant $n' = 1$ dans la formule $n' = \sqrt{n^2 - \cos^2\alpha}$; mais, indépendamment de la difficulté de tailler un semblable prisme pour chaque substance à étudier, on voit que, pour que les rayons réfléchis totalement en o sortent par la face AB (*fig.* 1527), il faut que l'angle r, qui est complémentaire de l'angle limite θ, soit moindre que cet angle, et que, par conséquent, θ soit plus grand que 45°; ce qui suppose que la substance est moins réfringente que le verre, θ diminuant quand le pouvoir réfringent augmente.

Nous verrons plus tard d'autres méthodes pour mesurer les indices de réfraction; dans les unes, on fait usage du microscope; les autres sont fondées sur les principes du système des ondulations.

2013. Indice de réfraction des substances opaques. — La méthode par la réflexion totale présente cette particularité singulière, qu'elle s'applique aux substances opaques. Dans le cas où l'on opérerait avec un prisme droit, suivant la méthode de Wollaston (2011), il faudrait appliquer la formule $n' = \sqrt{n^2 - \cos^2\alpha}$. Mais rien n'autorise à étendre au cas des corps opaques, les raisonnements par lesquels on rend compte de la réflexion totale et l'on calcule

l'angle limite. Les forces qui agissent sur la lumière ne sont pas les mêmes dans les deux cas ; les rayons, au lieu de passer librement, étant absorbés en totalité, dans les corps opaques, après avoir pénétré à une profondeur excessivement petite. Nous ferons connaître plus tard, en parlant de la lumière polarisée, une loi trouvée par M. Brewster, qui permet de calculer l'indice de réfraction des corps opaques. Or, les résultats déduits de cette loi ne sont pas d'accord avec ceux que l'on obtient par le procédé de la réflexion totale; ce qui légitime les doutes que nous venons d'émettre. Des considérations tirées de la théorie de l'émission conduisent à doubler, dans la formule ci-dessus, le second terme du radical, de manière qu'elle devient $n'^2 = n^2 - 2\cos^2 \alpha$. Mais la théorie des ondulations ne conduit pas à cette formule.

2014. Résultats. — Plusieurs physiciens ont donné des tables des indices de réfraction d'une foule de substances. Le tableau qui suit renferme un certain nombre de résultats; ils correspondent aux rayons jaunes, excepté ceux qui sont dus à Wollaston, et qui, d'après Young, appartiendraient au rouge extrême. Les noms des observateurs, Newton, Fraunhofer, Malus, Young, Biot, Wollaston, Herschel, Euler fils, Rochon, sont indiqués par la première ou les deux premières lettres de leur nom.

INDICES DE RÉFRACTION DES CORPS SOLIDES.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de RÉFRACTION.	OBSERVATEURS.	NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de RÉFRACTION.	OBSERVATEURS.
Chromate de plomb. .	de 2,50 à 2,97	Br.	Sucre.	1,535	W.
Diamant.	2,47 à 2,75	Br., R.	Acide phosphorique. .	1,544	Br.
Phosphore..	2,224	Br.	Sulfate de cuivre . . .	1,531 à 1,552	Br.
Verre d'antimoine. . .	2,216	Br.	Beaume de Canada.. .	1,532	Y.
Soufre natif.	2,115	Br.	Acide citrique.	1,527	Br.
Zircon.	1,95	W.	Nitre..	1,514	Br.
Borate de plomb.. . .	1,866	H.	Spermaceti..	1,503	Y.
Carbonate de plomb. .	1,81 à 2.08	Br.	Crown-glass..	1,500	W.
Rubis.	1,779	Br.	Sulfate de potasse. . .	1,509	Br.
Feldspath.	1,764	Br.	Sulfate de fer.	1,494	Br.
Tourmaline.	1,668	Br.	Suif; cire.	1,492	Y.
Topaze incolore. . . .	1,610	Bi.	Sulfate de magnésie..	1,488	Br.
Béril.	1,598	Br.	Spath d'Islande. . . .	1,654	M.
Écaille de tortue.. . .	1,591	Br.	Obsidienne..	1,488	Br.
Émeraude.	1,585	Br.	Gomme.	1,476	N.
Flint-glass..	1,57 à 1,58	Br., W.	Borax.	1,475	Br.
Cristal de roche. . . .	1,547	W.	Alun..	1,457	W.
Sel gemme..	1,545	N.	Spath fluor.	1,436	Br.
Colophane.	1,543	W.	Glace.	1,340	W.

INDICES DE RÉFRACTION DES CORPS LIQUIDES.

NOMS DES LIQUIDES.	INDICES de RÉFRACTION.	OBSERVATEURS.	NOMS DES LIQUIDES.	INDICES de RÉFRACTION.	OBSERVATEURS.
Sulfure de carbone. .	1,678	Br.	Acide nitrique (densité, 1,18)..	1,410	Y., W.
Huile de cassia. . . .	1,631	Y.	Dissolution de potasse (densité, 1,416) . .	1,405	Fr.
Huile essentielle d'amandes amères. . .	1,603	Br.	Acide chlorhydrique concentré.	1,410	Bi.
Huile de noix.	1,50	Br.	Sel marin à saturation	1,575	»
— de lin.	1,485	W.	Alcool rectifié.	1,372	H.
— de naphte. . . .	1,475	Y.	Ether sulfurique. . . .	1,358	W.
— de navette. . . .	1,475	Br., Y.	Alun à saturation . .	1,356	H.
— d'olive.	1,470	Br.	Sang humain.	1,354	Y.
— de térébenthine.	1,470	W.	Blanc d'œuf.	1,351	E.
— d'amandes. . . .	1,469	W.	Vinaigre distillé . . .	1,372	H.
— de lavande.. . .	1,457	Br.	Salive.	1,339	Y.
Acide sulfurique (densité, 1,7).	1,429	N.	Eau.	1,336	W., Br.

Remarques. — 1° Les indices de réfraction, attribués par divers physiciens à la même substance, diffèrent souvent notablement ; les différences se montrent quelquefois dès la seconde décimale. Cela tient, en partie, à l'imperfection des méthodes, mais surtout au défaut d'identité des échantillons observés. Malheureusement, la plupart des physiciens ont négligé d'indiquer la composition chimique des corps sur lesquels ils ont opéré, et de faire connaître la température des observations.

2° Les résultats généraux que l'on peut déduire de la multitude d'indices mesurés sont très peu nombreux. Newton, ayant remarqué que les huiles, qui sont combustibles, possèdent un indice assez grand, et que le diamant et l'eau ont un indice peu différent de ceux des huiles, avait conclu, avec une grande hardiesse, que le diamant et l'eau devaient contenir quelque principe combustible; ce que la chimie moderne a confirmé en montrant que le diamant est du carbone cristallisé, et que l'eau renferme un gaz inflammable.

3° On peut dire, en général, que tout ce qui augmente la densité *d'une même substance*, augmente aussi sa réfrangibilité. Ainsi M. Jamin a trouvé, par une méthode que nous ferons connaître plus tard (Ch. VI) que la compression augmente sensiblement la réfrangibilité de l'eau. La dilatation par la chaleur diminue l'indice des liquides ; ainsi, M. Brewster trouve que l'éther dont l'indice est 1,358 à la température ordinaire, ne donne que 1,057 quand son volume est triplé par la chaleur. MM. Dale et Gladstone ont fait de nombreuses expériences à ce sujet, sur 12 liquides différents, entre 0° et 50° [1]. Ils

[1] *Transactions philos.*, pour 1858 ; et *Ann. de ch. et de phys.*, 3e série, LVIII, p. 117.

ont employé l'appareil de Fraunhofer (2007); seulement le prisme était horizontal et échauffé par une lampe à alcool, ou refroidi par l'application d'un mélange réfrigérant. Un thermomètre avec lequel on agitait le liquide en donnait la température; le tableau suivant contient une partie des résultats trouvés; ces résultats sont relatifs à la raie D du spectre solaire, excepté ceux du phosphore qui se rapportent à la raie C.

TEMPÉRATURE.	SULFURE de CARBONE.	EAU.	ÉTHER.	ALCOOL ABSOLU.	ESPRIT DE BOIS.	PHOSPHORE LIQUIDE.	ESSENCE DE CASSIA.
0°	1,6442	1,3330	»	»	»	»	»
10	1,6346	1,3327	1,3592	1,3658	1,3379	»	»
20	1,6261	1,3320	1,3545	1,3615	»	»	»
30	1,6182	1,3309	1,3495	1,3578	»	2,0741	»
40	1,6103	1,3297	»	1,3536	1,3207	2,0677	1,5796
50	»	1,3280	»	1,3491	»	2,0603	»
60	»	1,3250	»	1,3437	»	2,0515	1,5690

Arago a reconnu que l'indice de l'eau diminue d'une manière continue entre —1°,3 et +5°,2. Le passage par le maximum de densité ne change donc pas le sens des variations. Ce résultat a été confirmé par M. Jamin et par MM. Dale et Gladstone.

4° Quand un corps passe de l'état solide à l'état liquide, tantôt la réfrangibilité diminue, comme pour l'acide phosphorique, la cire, le suif; tantôt elle augmente, comme pour l'eau, le borax; tantôt elle ne varie pas sensiblement, comme pour le sucre.

5° M. H. Deville a mesuré l'indice de réfraction de l'*alcool*, de l'*esprit de bois* et de l'*acide acétique*, mêlés d'eau en différentes proportions. Ces substances donnent le maximum de contraction ou de densité, quand on les unit à 3 équivalents d'eau. C'est aussi avec cette proportion d'eau que les deux dernières possèdent le maximum de réfrangibilité; tandis qu'il se présente, pour l'alcool, quand il y a un seul équivalent d'eau. A la température de 16°, l'*alcool absolu* a pour indice 1,3633, et avec un équivalent d'eau, 1,3662. L'*esprit de bois* et l'*acide acétique anhydres* ont pour indice 1,3358 et 1,3753; et avec 3 équivalents d'eau, 1,3462 et 1,3781 [1].

II. Mesure de l'indice de réfraction des gaz.

2015. Définition de la puissance réfractive. Pouvoir réfringent. — Avant d'exposer les méthodes par lesquelles on mesure l'indice de réfraction

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. V, p. 129.

des gaz, il nous faut poser quelques définitions. Nous verrons qu'il résulte de la théorie des ondulations, et de celle de l'émission, que l'indice de réfraction n'est autre chose que le rapport entre les vitesses v et v' de la lumière dans les deux milieux consécutifs. On a donc $n = v' : v$. Si nous supposons un mobile qui suivrait la même route que la lumière, en éprouvant les mêmes changements de vitesse, sa *force vive* (1,77) varierait, en passant d'un milieu dans l'autre, de $v'^2 - v^2$; et de $\frac{v'^2 - v^2}{v^2} = n^2 - 1$, par rapport à sa force vive primitive. La quantité $n^2 - 1$ indique donc l'effet que le milieu réfringent dans lequel pénètre la lumière exerce sur sa vitesse; on la nomme *puissance réfractive*. Si n était égal à 1, c'est-à-dire si le rayon n'éprouvait pas de déviation en changeant de milieu, la puissance réfractive serait nulle. n représente ici, l'indice absolu, si l'un des milieux est le vide, et l'indice relatif si les deux milieux sont pondérables.

Dans le système de l'émission, on trouve que la puissance réfractive est proportionnelle à la densité d; de sorte que le rapport $\frac{n^2 - 1}{d}$ serait constant, quel que fût l'état de la substance dans laquelle pénètre le rayon, qu'elle fût, par exemple, comprimée ou dilatée, à l'état solide ou gazeux. Mais des expériences de Petit et Arago, faites sur la même substance à l'état liquide et à l'état de vapeur, ont prouvé que cette loi est fausse[1]. Cela résulte aussi de la comparaison que nous ferons (2018), des indices de certaines vapeurs aux indices des liquides qui les fournissent. Cependant, la loi pourrait bien être vraie pour une même substance sous le même état, et dont la densité serait modifiée, soit par la chaleur, soit par la compression. M. Jamin a trouvé qu'elle est vraie pour l'eau différemment comprimée; de telle sorte qu'on peut, en partant de l'indice de réfraction sous différentes pressions, conclure le coefficient de compressibilité de ce liquide. Nous verrons aussi que cette loi paraît vraie pour un même gaz à différentes pressions. Quoi qu'il en soit, on a donné le nom de *pouvoir réfringent*, au rapport $(n^2 - 1) : d$. Nous ajouterons que quelques auteurs désignent sous le nom de *pouvoir réfringent*, l'indice de réfraction absolu, pour le distinguer de l'indice relatif.

2016. Mesure de l'indice de réfraction des gaz. — La réfraction de l'air, jouant un rôle important dans les observations astronomiques (1953), on conçoit combien il était intéressant d'en chercher une évaluation exacte. D'un autre côté, les grandes variations de densité qu'éprouvent les gaz par la compression et la dilatation, faisaient espérer que l'on pourrait soumettre à une vérification rigoureuse la constance du *pouvoir réfringent* d'un même gaz. Aussi, les membres de l'ancienne Académie des sciences de Paris avaient-ils fait de nombreuses tentatives pour mesurer la réfraction de l'air, mais ils n'avaient pu distinguer de déviation dans un rayon traversant un prisme creux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. I, p. 1.

dans lequel ils avaient fait le vide, et qui, plongé dans l'air, devait dévier le rayon vers son sommet (1968). La Société royale de Londres fut plus heureuse : Lewthorp et Hauksbée, non seulement obtinrent une déviation sensible, mais encore donnérent une valeur assez exacte de l'indice de l'air. Borda, voulant reprendre les expériences de l'Académie de Paris, fit construire un prisme dans les conditions les plus avantageuses pour rendre la déviation très sensible; mais il n'en fit pas usage.

Expériences de Biot et Arago. — Ces expériences ont été faites en 1805 au moyen du prisme de Borda[1]. Ce prisme (*fig.* 1530) consiste en un tube de verre *ab* de 4 à 5 centimètres de diamètre, taillé en biseau à ses deux extrémités, qui sont fermées par des lames de verre minces à faces bien parallèles (2010), formant entre elles un angle de 143° 7′ 28″. Ce prisme est monté, de manière que son arête soit verticale, sur un tuyau à robinet *r*, qui s'adapte à la platine d'une machine pneumatique; il peut tourner autour d'un axe passant par son milieu. Un baromètre à siphon, renfermé dans une éprouvette, H, indique la pression du gaz qui remplit le prisme.

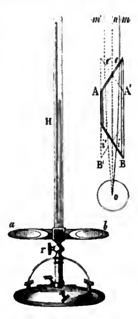


Fig. 1530.

Indice de réfraction de l'air. — Pour mesurer l'indice de réfraction de l'air, Biot et Arago ont fait le vide le plus parfait possible dans le prisme creux, après l'avoir bien desséché en y introduisant plusieurs fois de l'air sec, et ils ont ensuite appliqué la méthode de Newton, avec cette différence que le prisme étant moins réfringent que le milieu ambiant, ils ont cherché la déviation *maximum* au lieu de la déviation *minimum* (1975). Le prisme et le cercle répétiteur horizontal étaient installés dans une des salles du Palais du Luxembourg, à Paris ; un des paratonnerres de l'Observatoire servait de mire. Les déviations étant extrêmement petites, l'épaisseur du prisme empêchait de viser directement la mire. Pour lever cette difficulté, après avoir visé la mire à travers le prisme, dont on voit la coupe en AB, et obtenu le *maximum* de déviation au moyen du rayon *meio*, on amenait le prisme dans la position A′B′ en lui faisant faire un demi-tour, et l'on visait de nouveau la même mire, dont l'image *m′* se trouvait alors rejetée du côté opposé, par rapport à un rayon *no* venant directement de la mire. L'angle *ioi′* représente évidemment le double de la déviation *noi*. On retournait ensuite plusieurs fois le prisme dans les deux positions, de manière à appliquer la méthode de répétition. Ce moyen est

[1] *Mém. de l'Acad. des sc.*, t. VII (1807), et *Traité de phys.*, par M. Biot, t. III, p. 222.

plus exact que celui qui consisterait à enlever le prisme, qu'on ne serait pas certain de replacer exactement de la même manière en appliquant la répétition. On évalue par le même procédé la déviation que pourraient produire les lames de verre qui forment le prisme, en opérant sur ce prisme rempli d'air ambiant, et l'on en corrige les résultats.

Biot et Arago ont trouvé ainsi, pour l'indice de réfraction de l'air, à la température de 0° et à la pression de 0m,76, $n = 1,000\ 294$. La *puissance réfractive* est alors $n^2 - 1 = 0,000\ 588$. Ces nombres sont d'accord avec ceux que d'Alembert avait déduits des réfractions astronomiques.

Indice des gaz autres que l'air. — L'indice de l'air étant connu, celui des autres gaz se détermine en en remplissant le prisme, par la méthode et avec toutes les précautions que nous avons mentionnées en traitant de la densité des gaz, et mesurant leur indice de réfraction relatif à l'air ambiant. Biot et Arago ont opéré sur l'*oxygène*, l'*hydrogène*, l'*azote*, l'*acide carbonique*, le *gaz ammoniac*, et l'*acide chlorhydrique*. Ayant opéré sur ces gaz et sur l'air à diverses pressions, ils ont trouvé que *la puissance réfractive* ($n^2 - 1$) *d'un même gaz est proportionnelle à sa densité* ; ou, ce qui revient au même, *que le pouvoir réfringent d'un gaz est constant, quelle que soit sa température et sa pression*. Cette loi s'applique aux mélanges gazeux, car la puissance réfractive du mélange est égale à la somme des puissances des gaz mélangés, rapportées à leur pression particulière dans le mélange.

Malheureusement, cette loi n'a été constatée que pour des pressions égales ou inférieures à la pression ordinaire de l'atmosphère, à cause de la difficulté de maintenir dans le prisme une pression plus grande que la pression extérieure. Or, dans des limites aussi restreintes, la proportionnalité ne peut manquer de se vérifier; car, si l'on pose, en général, en appelant h la pression du gaz, $n^2 - 1 = ah + bh^2 + ch^3 + \ldots$, et si l'on suppose h plus petit que l'unité, on pourra négliger les termes qui contiennent h^2, $h^3 \ldots$, et l'on aura $n^2 - 1 = ah$. On peut donc penser que la loi n'est qu'approximative, et pour les faibles pressions ; d'autant plus que les déviations observées laissent quelques incertitudes, d'abord à cause de leur petitesse, car elles ne sont que de quelques minutes, ensuite parce que les plus faibles changements dans l'état de l'atmosphère, pendant l'expérience, qui demande un temps assez long, modifient notablement les résultats. Il est vrai que les savants observateurs ont eu soin de choisir un état atmosphérique dans lequel ces changements ne pouvaient être qu'extrêmement lents. Néanmoins, la déviation n'étant que de 5′ environ, ils ont trouvé, en opérant à différentes époques, jusqu'à 16″ de différence.

2017. Expériences de Dulong. — Dulong a fait un grand nombre d'expériences sur les indices de réfraction des gaz, par une méthode assez prompte pour qu'il n'y ait pas à craindre les variations atmosphériques, et qui, de plus, dispense de s'occuper du défaut de parallélisme des lames, les résultats étant indépendants de la perfection du prisme[1]. Dans cette méthode,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXXI, p. 154.

Dulong est parti de la loi dont nous venons de nous occuper ; ce qui était permis parce qu'il a toujours donné aux gaz une pression au plus égale à celle de l'atmosphère. Du reste, il a vérifié cette loi, dans les mêmes limites de pressions, en constatant que la *puissance réfractive* d'un mélange de gaz est égale à la somme des puissances des gaz mélangés, rapportés à leur pression particulière dans le mélange.

Voici le principe de la méthode de Dulong : on vise avec une lunette une mire éloignée, à travers un prisme semblable à celui de Borda, rempli d'air sec. On fixe ce prisme, ainsi que la lunette, et on le remplit d'un autre gaz, dont on fait varier peu à peu la pression, jusqu'à ce que l'image de la mire coïncide de nouveau avec le fil de la lunette. Il est évident que l'indice du gaz est égal sous cette pression, H', à celui de l'air sous la pression, H, qu'il possédait. En appelant n' et n les indices de réfraction du gaz et de l'air *à la même pression* H, *et à la même température*, et N l'indice du gaz à la pression H', lequel est égal à n, on aura pour le gaz, d'après la loi des puissances réfractives

$$n'^2-1 : N^2-1 = H : H', \qquad \text{ou} \quad n'^2-1 : n^2-1 = H : H'.$$

Si l'on voulait ramener les résultats à ce qu'ils seraient à une température et à une pression données, par exemple à la température de 0° et à la pression de $0^m,76$, il n'y aurait rien à changer à la proportion, car il faudrait faire subir aux puissances réfractives les mêmes changements qu'aux densités, c'est-à-dire les multiplier par une même quantité dépendant de la pression et de la température, tous les gaz se dilatant et se comprimant de la même manière dans les limites des variations de l'atmosphère.

La figure 1531 représente l'appareil de Dulong. *ab* est le prisme creux, dont l'angle est de 145° ; il communique avec un gros tube de verre TT, de 1 mètre de longueur, fermé à ses deux extrémités par des viroles en fer. La virole supérieure porte trois tubulures destinées à faire communiquer le tube T, la première par le tube *n* avec le prisme, la seconde par le tube *t* avec une machine pneumatique, et la troisième par le tube *t'*, avec une cloche *c* reposant sur une cuve à mercure et contenant le gaz à étudier. Le cylindre T peut être rempli de mercure par le tube latéral *cd*. L est une lunette fixe à réticule, au moyen de laquelle on vise la mire à travers le prisme. Cette lunette grossissait assez pour qu'on pût reconnaître dans l'élasticité de l'air, une variation de 1 millimètre, correspondant à $\frac{1}{700}$ environ de l'effet total. Comme on ne peut répondre de la pureté des gaz qu'à moins $\frac{1}{200}$, un plus fort grossissement n'aurait pas donné plus de précision.

Après avoir desséché tout l'intérieur de l'appareil, en y faisant passer un courant d'hydrogène sec, on faisait le vide, et l'on remplissait le prisme d'air sec, par le tube latéral *r'* de la machine pneumatique. Cet air étant à la pression atmosphérique, on visait la mire avec la lunette L, puis on fixait solidement le prisme et la lunette. On introduisait ensuite le gaz bien sec, en faisant le vide

plusieurs fois pour enlever les dernières portions d'air ; puis, laissant échapper du mercure par le robinet *r*, on faisait varier la pression jusqu'à ce que la mire coïncidât de nouveau avec le fil micrométrique de la lunette L. La pression était donnée par le tube barométrique *m* de la machine pneumatique.

Quand le gaz était moins réfringent que l'air, comme l'oxygène et l'hydrogène, au lieu de porter la pression au-dessus de celle de l'atmosphère, Dulong a préféré remplir d'abord le prisme de gaz, puis d'air sec, dont il diminuait la pression de manière à rétablir la coïncidence.

Quand le gaz attaquait le mercure, comme le chlore, on modifiait la méthode. Le tube *n* était composé de trois parties, représentées à part en ND (*fig.* 1531). La partie moyenne AB était surmontée d'une cuvette A dans laquelle s'enfonçait la partie N. En D, était une autre cuvette recevant l'extrémité B. Il y avait assez de jeu entre les cuvettes et les tubes, pour que la partie AB pût s'enlever sans déranger les tubes N et D. Du mastic très fusible, coulé dans les cuvettes, empêchait toute fuite de gaz. Quand on voulait opérer sur un gaz attaquant le mercure, on fondait le mastic et on enlevait la partie moyenne AB. On faisait passer un courant de gaz à travers le prisme ; ce gaz arrivait par le tube supérieur HE et sortait en *n*, où était ajusté un tube qui le conduisait au dehors du laboratoire. Quand la mire visée à travers le prisme ne paraissait plus se déplacer, ce qui indiquait que le gaz était pur, on fixait la lunette L. On chassait ensuite le gaz au moyen d'un courant d'acide carbonique, on rétablissait le tube AB en coulant du mastic en A et B, on fermait l'orifice E avec un bouchon en verre garni de cire molle, et après avoir fait le vide, on remplissait le prisme d'un gaz plus réfringent que celui sur lequel on venait d'opérer. Dans le cas du chlore, Dulong employait le cyanogène. La puissance réfractive K de ce dernier gaz par rapport à l'air ayant été mesurée, il évaluait celle du chlore par rapport à l'air, en multipliant par K la puissance réfractive du chlore par rapport au cyanogène. Ce procédé demandant un temps assez long, on n'opérait que dans les circonstances atmosphériques les plus favorables, et vers le maximum de température du jour.

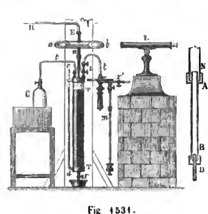


Fig 1531.

Pour opérer sur une vapeur ne pouvant supporter la pression atmosphérique à la température ordinaire, après avoir fait le vide, on remplissait, de la substance à l'état liquide, l'intervalle des deux robinets *s*, et ouvrant le robinet inférieur,

on introduisait en T une petite quantité de liquide qui se répandait en vapeurs dans le vide.

2018. Résultats. — Le tableau suivant renferme les résultats trouvés par Dulong :

GAZ OU VAPEURS.	PUISSANCE RÉFRACTIVE par rapport à l'air.	excès sur le calcul.	absolue $n^2 - 1$.	INDICE DE RÉFRACTION.	DENSITÉ.
Air	1,000	»	0,000589	1,000294	1,000
Oxygène	0,924	»	0,000544	1,000272	1,106
Hydrogène	0,470	»	0.000277	1,000138	0,069
Azote	1,020	»	0,000601	1,000300	0,971
Chlore	2,623	»	0,001545	1,000772	2,470
Protoxyde d'azote	1,710	+ 0,228	0,001007	1,000503	1,520
Gaz nitreux	1,030	+ 0,058	0,000606	1,000303	1,039
Acide chlorhydrique	1,527	— 0,020	0,000899	1,000449	1,247
Oxyde de carbone	1,157	»	0,000681	1,000340	1,957
Acide carbonique	1,526	— 0,093	0,000899	1,000449	»
Cyanogène	2,832	»	0,001668	1,000834	1,806
Gaz oléfiant	2,302	»	0,001356	1,000678	0,978
Gaz des marais	1,504	»	0,000886	1,000443	0,555
Ether chlorhydriq.	3,720	— 0,099	0,002191	1,001095	2,234
Acide cyanhydrique	1,531	— 0,130	0,000903	1,000451	0,944
Ammoniaque	1,309	+ 0,093	0,000771	1,000385	0,596
Acide chloroxycarbonique	3,936	+ 0,0152	0,002318	1,001159	3,442
Acide sulfhydrique	2,187	»	0,001288	1,000644	1,191
Acide sulfureux	2,260	»	0,001331	1,000665	2,234
Ether sulfurique	5,197	»	0,003061	1.900153	2,580
Sulfure de carbone	5,110	»	0,003010	1,000150	2,644
Protophosphure d'hydrogène	2,682	»	0,001579	1,000789	1,214

Il résulte de ce tableau et des observations de Biot et Arago, que :

1° Il n'y a pas de relation simple entre les puissances réfractives des gaz et leurs densités. Ainsi, la densité de la vapeur d'éther chlorhydrique est un peu plus faible que celle de l'acide sulfureux, et la puissance réfractive du premier est supérieure à celle de l'acide sulfureux, de plus des $\frac{2}{3}$ de celle-ci ; la vapeur

d'éther sulfurique possède à peu près la même densité que le chlore, et sa puissance réfractive est double. Cela ayant lieu pour les gaz simples qui, sous la même pression et à la même température, ont leurs molécules également distantes, on voit que ces molécules n'agissent pas de la même manière sur la lumière; d'où l'on peut conclure que les capacités calorifiques et les puissances réfractives n'appartiennent pas au même ordre de cause.

2° La puissance réfractive des gaz et des vapeurs est proportionnelle à leur pression ; mais cette loi n'a été vérifiée que pour des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Elle a été trouvée exacte pour des températures comprises entre 8° et 32°.

3° La puissance réfractive d'un mélange de gaz est égale à la somme des puissances réfractives des gaz mélangés, rapportées à la pression particulière de chacun d'eux dans le mélange.

4° La puissance réfractive d'un composé gazeux n'est pas égale à la somme des puissances des gaz composants ; elle est tantôt plus grande, tantôt plus petite que cette somme. Ce résultat, que Dulong a constaté sur le plus grand nombre de gaz possible, se voit dans la 3e colonne du tableau, où se trouvent les différences entre les résultats observés et ceux qu'on obtient en prenant les sommes des puissances des gaz composants. Ces différences sont bien supérieures à celles qui pourraient provenir des erreurs d'observation. — L'air ayant une puissance réfractive égale à la somme des puissances de l'oxygène et de l'azote, rapportées à leur pression particulière, on en conclut que l'air est un mélange et non une combinaison des deux gaz.

2019. Indice de la vapeur d'eau. — La vapeur d'eau entrant dans la composition de l'atmosphère, il était important d'en connaître l'indice de réfraction. Laplace ayant voulu faire entrer cet indice dans les formules par lesquelles il a représenté la réfraction atmosphérique, en a calculé la valeur au moyen de l'indice de l'eau, en se servant de la loi des pouvoirs réfringents proportionnels à la densité, loi inexacte (2015). Biot a cherché à obtenir, par l'expérience, un résultat plus digne de confiance ; mais il n'a pu saisir aucune différence de déviation quand le prisme de Borda était rempli d'air sec ou d'air saturé de vapeur. M. Jamin a repris la question par une méthode très précise que nous ferons connaître plus tard (ch. VI), et a trouvé, en appliquant la loi de la proportionnalité pour un même gaz, des puissances réfractives aux densités, que la vapeur d'eau, à la température de 0° et sous la pression de 0m,76, aurait pour indice, si elle pouvait exister sous une semblable pression, la valeur 1,000261, qui est moindre que l'indice de l'air dans les mêmes conditions. La puissance réfractive serait donc $n^2 - 1 = 0,000521$; tandis que, si on la calcule en partant de l'indice de l'eau, au moyen de la loi des pouvoirs réfringents, on trouve le nombre 0,000625.

En ajoutant à l'indice de l'air sec, celui de la vapeur d'eau à saturation sous la pression qu'elle possède à 20°, M. Jamin trouve que la différence entre les indices de l'air sec et de l'air saturé, n', n'est que 0,000 000 726. La vapeur

d'eau n'apporte donc à l'indice de l'air que des modifications beaucoup trop petites pour être sensibles avec le prisme de Borda. Il n'est donc pas étonnant que Biot n'ait pas trouvé de différence entre l'air sec et l'air humide, et l'on voit qu'il est inutile d'introduire dans les formules de la réfraction atmosphérique, un terme relatif à la présence de l'humidité.

2020. Indice des vapeurs produites à des températures élevées. — L'action d'un corps sur la lumière qui le traverse dépend à la fois de sa structure et de la nature de sa substance. L'influence de la structure est éliminée dans l'état fluide, et en particulier dans l'état gazeux, ce qui donne une grande importance aux indices des corps en vapeur. C'est pourquoi M. Leroux a entrepris de mesurer les indices des vapeurs de divers corps simples qui ne se vaporisent qu'à une haute température [1]. Il a déduit l'indice de la vapeur par rapport à l'air à la même température, de la déviation minimum à travers un prisme en fer formé par des glaces et rempli de la vapeur à étudier. En admettant que le rapport des dilatations de l'air et de la vapeur soit constant, on peut regarder le pouvoir réfringent $(n^2 - 1) : d$ comme constant pour une même substance, et ramener par le calcul les indices des diverses vapeurs à la même température.

La figure 1532 représente l'appareil employé. Le prisme est représenté à part en P, P′ ; P est une coupe par un plan perpendiculaire aux arêtes, et P′ une vue par l'arête de sommet placée verticalement. Le prisme est percé suivant *ll′*, d'un canal fermé par des glaces *l* et *l′* choisies avec soin. Ces glaces sont maintenues par des cadres en fer *ff* et *f′f′*, pressés par des pinces à vis, *p*, *p*... ; un mastic formé d'azotate de potasse et de blanc de Meudon est interposé entre les glaces et le prisme de fer. Quand la température devait dépasser 600°, l'azotate était remplacé par du borate de soude ou des silicates facilement fusibles. O, O sont des ouvertures destinées à nettoyer les glaces, et fermées par des bouchons à vis *k*, avec interposition d'anneaux en cuivre.

Le prisme, dont l'angle a été mesuré au moyen de la réflexion, est surmonté d'un tube par lequel s'échappe l'excès de vapeur ; un disque mince posé sur l'ouverture *o*, *o* fait soupape, et permet à la pression intérieure de s'équilibrer avec l'extérieure. Le prisme est joint à une plaque de fer, *mm*, bien dressée et bien parallèle à sa base, par laquelle on le suspend dans une boîte en fer forgé *b* munie de deux ouvertures opposées, et représentée à part en VB. Des crochets à vis, V, serrent la plaque contre les bords bien dressés de la boîte, qui est entourée d'une enveloppe en tôle E, *e*, pouvant contenir du plomb fondu. La boîte est fixée à l'extrémité d'une colonne en fer *cc′* pouvant tourner sur elle-même sur une pointe inférieure et dans un collet *s*, pour appliquer le retournement. Les angles se mesurent sur un cercle gradué *rr*, au moyen de l'alidade à vernier *a*.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXI, p. 385.

Le prisme est échauffé au moyen d'un fourneau en tôle revêtu de briques FF, suspendu à la boîte et à son enveloppe, au moyen de deux traverses en fer *t*, faisant corps avec l'enveloppe *e*. Les mouvements de l'air chaud à l'extérieur du prisme troubleraient les images; pour éviter cet inconvénient, aux ouvertures opposées de la boîte sont adaptés des tubes en fer D, D fermés par des glaces, et dans lesquels l'air échauffé ne peut former de courants, et se trouve distribué en tranches à peu près verticales, à travers lesquelles les rayons ne sont pas déviés; comme on s'en est assuré, du reste, en opérant avec le prisme rempli d'air. Pour empêcher la chaleur d'arriver jusqu'aux glaces, il y a en D, D des portions de tube en cuivre, autour desquelles circule un courant d'eau.

La lumière d'une lampe, ou celle du soleil réfléchie par un héliostat, passe par un collimateur C, formé par une lunette dont l'oculaire est remplacé par

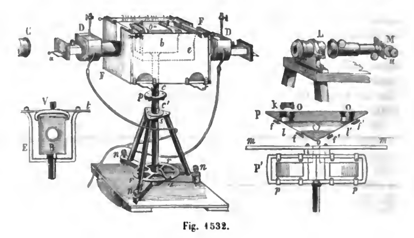


Fig. 1532.

une plaque munie d'une fente verticale très fine. Les rayons qui ont traversé le prisme, sont reçus par une lunette L destinée à mesurer la déviation. Cette lunette est fixe et munie d'un micromètre M, consistant en deux fils croisés inclinés à 45° sur l'horizon, et recevant un mouvement horizontal d'une vis micrométrique *n* dont le pas a $\frac{1}{2}$ mm et dont la tête porte 200 divisions. L'oculaire se meut avec le micromètre et grossit assez pour qu'on puisse apprécier le déplacement correspondant à 4 divisions de la tête. On mesure ainsi le déplacement de la mire quand le prisme agit sur la lumière, et on en déduit la déviation en considérant ce déplacement comme l'arc qui la mesure; arc dont le rayon est égal à la distance, d'environ 2 mètres, du micromètre au centre optique de l'objectif. Cette méthode permettait d'opérer rapidement, et l'erreur ne pouvait être de 1". — Comme la course du micromètre était peu étendue, quand on avait à mesurer une déviation de plus de 12', on se servait d'un prisme auxiliaire en verre, que l'on plaçait sur une petite plate-forme bien

horizontale, α, de manière que la face d'entrée du prisme fût bien parallèle à la glace qui ferme le tube D. La déviation de ce prisme se mesurait sur l'appareil même ; elle était de 17′ environ.

Voici la marche de l'opération. On commence par placer la boîte *b* bien horizontalement, en agissant sur les vis calantes *n*, *n*, *n*, et sur 6 vis appartenant à un système de deux plateaux *p*, qui réunissent les deux parties *c*, *c′* de l'arbre, et dont trois tendent à les rapprocher et les trois autres, à les écarter ; un niveau à bulle d'air posé sur les bords de la boîte doit rester horizontal pendant qu'on fait tourner l'appareil. On place ensuite le prisme, puis on chauffe jusqu'à 300° environ, pour ramollir le mastic. On place ensuite les glaces des tubes D, D, on vise la mire lumineuse au milieu de sa largeur, on recommence après le retournement, et l'on connaît ainsi le double de la déviation que produisent les glaces. On introduit ensuite dans le prisme la substance qui doit fournir la vapeur, et quand la température est arrivée au point convenable, on observe la déviation, en employant le retournement si la vapeur ne se dissipe pas trop vite. — Il est bon de terminer en chassant la vapeur par un courant d'air, et d'observer de nouveau la déviation que produisent les glaces de l'appareil. — Toutes les causes d'erreur, discutées minutieusement, ont été reconnues négligeables. Le tableau suivant renferme les résultats trouvés par M. Leroux :

SUBSTANCES.	INDICES ABSOLUS.	$n^2 - 1$ $\times 1000$.	DENSITÉ (D).	POUVOIR réfringent P $\times 1000$.	ÉQUIVALENTS H = 1.	PRODUIT DE P par l'équivalent.
Soufre....	1,001629	3,258	6,617	0,492	16	7,87
Phosphore..	1,001364	2,728	4,355	0,626	31	19,41
Arsenic....	1,091114	2,228	10,39	0,214	75	16,08
Mercure...	1,000556	1,112	6,976	0,159	100	15,93

Le pouvoir réfringent du soufre 0,0004923 et celui de l'oxygène trouvé par Dulong, 0,0004924, sont égaux, et l'on sait que ces corps ont de nombreuses analogies chimiques. Une comparaison semblable peut être faite entre les pouvoirs réfringents 0,0006264 et 0,0006187 du phosphore et de l'azote, corps qui ont aussi de nombreuses analogies chimiques. Malheureusement la loi qui semble ressortir de ce rapprochement n'est établie jusqu'à présent que sur ces deux cas.

CHAPITRE IV.

CHROMATIQUE.

Virgula solet fieri vitrea, stricta, vel pluribus angulis in modum clavæ torsa : hæc si ex transverso solem accipit, colorem talem qualis in arcu videri solet, reddit.

(SENEC. *Quæst. natural.*, lib. I, cap. VI).

2021. Nous avons considéré jusqu'à présent les rayons lumineux comme des lignes mathématiques, abstraction faite des qualités ou propriétés physiques qui peuvent les distinguer, et nous avons étudié les changements de directions qu'ils éprouvent quand ils se réfléchissent ou se réfractent sur des surfaces de forme donnée. Cette partie de l'étude de la lumière constitue l'*optique géométrique*. On peut étudier les rayons lumineux à un autre point de vue, et considérer les phénomènes qui dépendent des qualités particulières qu'ils peuvent posséder, soit qu'elles se manifestent par la manière dont ces rayons impressionnent l'organe de la vue, soit par les effets divers qu'ils produisent en se rencontrant, ou qu'ils éprouvent de la part des milieux qu'ils traversent, ou de la part des corps qu'ils viennent raser de très près. Cette seconde branche de l'optique est l'*optique physique* dont nous allons nous occuper dans ce chapitre et dans ceux qui suivent.

2022. **De la chromatique.** — La lumière rayonnée par les corps lumineux, ou renvoyée d'une manière diffuse par les corps éclairés, produit sur l'organe de la vue, des impressions diverses indépendantes de l'intensité et de la direction des rayons. Ces rayons possèdent donc des qualités différentes, qui constituent ce que nous désignons par le mot *couleur*. La partie de l'optique qui traite des couleurs est la *chromatique*, science créée par Newton ; avant lui on n'avait sur ce sujet que des notions vagues et erronées.

Les couleurs peuvent être considérées dans les rayons lumineux, ou dans les corps éclairés, qui les renvoient d'une manière diffuse et avec des teintes qui dépendent de leur substance et de l'état de leur surface. Ces couleurs, dont la nature embellit et diversifie à l'infini toutes ses productions, nous font distinguer les objets, indépendamment de leur forme, de leur grandeur et de leur position, par l'espèce de lumière qu'ils nous renvoient. Nous considérerons d'abord les couleurs, dans les rayons lumineux.

§ 1. — DISPERSION, OU DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR LA RÉFRACTION.

I. Théorie de la dispersion.

2023. Spectre solaire. — On a cru pendant longtemps, qu'il n'y avait rien de plus indivisible qu'un rayon lumineux, et si quelque philosophe s'était avisé de prédire qu'on pourrait un jour en séparer plusieurs parties distinctes, il n'aurait certainement rencontré que des incrédules. Une expérience ancienne reproduite et variée par Newton, lui a servi de point de départ pour une longue série de brillantes recherches, à la suite desquelles il a prouvé que la lumière blanche la plus pure est composée d'une multitude de rayons de couleur différente. Voici cette expérience.

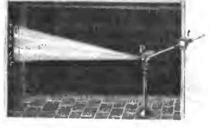


Fig. 1533.

On fait passer à travers un prisme P (*fig.* 1533) un mince pinceau *t*P de rayons solaires. Ce pinceau est dévié vers la base, et si on le reçoit sur un écran blanc, on reconnaît qu'il s'étale en éventail perpendiculairement aux arêtes du prisme, c'est-à-dire dans le plan de réfraction ; tandis qu'il conserve ses dimensions dans le sens parallèle à ces arêtes. Si l'écran est suffisamment éloigné, l'image allongée se montre colorée des nuances les plus vives, se succédant d'une extrémité à l'autre. Newton a donné à cette image le nom de *spectre solaire*, et au phénomène de l'apparition des couleurs dans le faisceau réfracté, le nom de *dispersion*. La forme du spectre est un rectangle, si l'ouverture du volet est elle-même rectangulaire. Les bords latéraux sont nettement terminés, mais les extrémités sont diffuses. Quand cette ouverture est circulaire, les extrémités sont arrondies en demi-cercle.

Newton a distingué dans le spectre solaire sept couleurs principales, qui sont, en commençant du côté de la base du prisme :

violet, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge* ;

série facile à retenir, parce qu'elle forme un vers alexandrin. Ces sept couleurs se désignent souvent sous les noms de *couleurs du spectre*, *couleurs de l'iris*. Elles ne sont pas les seules qui composent le spectre ; car on remarque qu'elles se fondent les unes dans les autres, de manière qu'on ne peut reconnaître les limites précises qui les séparent. Il y a donc une infinité de couleurs intermédiaires. Nous devons dire cependant qu'il existe une multitude d'inter-

ruptions dans le spectre solaire, mais elles sont excessivement petites ; nous en parlerons en particulier sous le nom de *raies du spectre* (2034).

Newton, afin d'éviter toute objection relativement aux modifications que la réflexion pourrait faire subir aux qualités des rayons, a fait ses expériences avec les rayons solaires entrant directement par le volet de la chambre obscure. Quand on veut se soumettre à la même condition, on se sert d'un tube *t* (*fig.* 1533) qui traverse une sphère pouvant tourner sur elle-même dans une cavité annulaire de même courbure, ce qui permet de placer le tube dans la direction des rayons solaires. En même temps, ce tube intercepte la lumière diffuse, qui pénétrerait, par un trou percé dans une lame mince. Quand il ne s'agit que de répéter les expériences, on peut employer sans inconvénient la lumière solaire réfléchie par un miroir métallique, ou, dans la plupart des cas, la lampe photo-électrique (2000).

La plupart des sources lumineuses donnent un spectre, quand leurs rayons traversent le prisme ; ce spectre est généralement moins brillant que celui du soleil. Les couleurs sont toujours disposées dans le même ordre, mais quelques-unes peuvent manquer, et l'on voit à leur place des bandes obscures.

La dispersion était connue des anciens. Sénèque en parle, et fait un rapprochement très juste entre ce phénomène et celui de l'arc-en-ciel. Grimaldi avait observé la dispersion, mais il n'y vit qu'une dilatation accidentelle du faisceau, due au défaut d'homogénéité du prisme, et il attribua les couleurs à une modification apportée par le verre à la nature des rayons, et dépendant de l'épaisseur qu'ils traversaient. Newton, ayant cherché à construire des lentilles sans aberration, reconnut que cela était impossible, quelles que fussent les courbures des faces, la dispersion se produisant, et les divers rayons colorés formant des foyers différents. Il étudia alors cette dispersion, et consigna les résultats de ses expériences dans son *Traité d'optique*, destiné spécialement au développement de sa théorie des couleurs, ouvrage qui excita, lors de son apparition, une admiration comparable à celle qui avait accueilli le livre des *principes* (I, 144).

2024. De l'étendue du spectre solaire. — 1° La longueur du spectre augmente avec l'angle du prisme, comme on peut le constater au moyen des prismes à angle variables des *fig.* 1489 et 1490. Pour avoir un beau spectre, on emploie un prisme en *flint-glass* dont l'angle est au moins de 60°.

2° L'étendue du spectre dépend de la substance du prisme. On le reconnaît au moyen du *polyprisme* AB (*fig.* 1534), composé de plusieurs prismes de même angle, mais de substance différente ; on fait tomber sur ce système un faisceau mince et assez large, dans le sens des arêtes, pour rencontrer à la fois tous les prismes, et l'on obtient plusieurs spectres placés les uns à côté des autres, et de position et d'étendue très différentes. Si les prismes sont incolores, on remarque que tous les spectres présentent les mêmes couleurs disposées dans le même ordre ; mais ces couleurs n'y occupent pas des espaces proportionnels. Par exemple, avec un prisme de verre ordinaire ou *crown-glass*, le rouge occupe relativement plus de place que dans le spectre formé par un

prisme de même angle en *flint-glass* ou cristal, et le spectre de ce dernier renferme plus de violet que celui du premier prisme.

Pour faire la même expérience avec des prismes liquides, on emploie le petit appareil *ae* (*fig.* 1534). Les deux lames de verre *abre*, *a'b'ce* sont à faces bien parallèles, et on remplit les compartiments avec différents liquides. Le sulfure de carbone donne un très beau spectre ; celui que produit l'eau, est peu étalé ; on le rend très brillant, en saturant l'eau d'acétate de plomb.

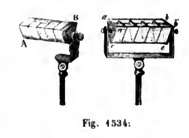


Fig. 1534.

L'inégale répartition des couleurs dans les spectres formés par divers prismes, avait échappé à Newton. Ce fait, dont nous verrons l'importance pratique, a été découvert par Clairaut et Boscowich, et confirmé par Blair, puis par Brewster, après avoir été contesté par Wollaston.

2025. Théorie de Newton. — Après avoir observé la dispersion dans les conditions les plus variées, Newton a expliqué ce phénomène au moyen des trois principes suivants :

1° *La lumière blanche n'est pas simple*, mais composée d'une infinité de rayons différents présentant les couleurs que l'on observe dans le spectre.

2° *Ces divers rayons sont inégalement réfrangibles* ; ce qui fait qu'ils se séparent les uns des autres en se réfractant. La *dispersion* n'est donc autre chose que la décomposition de la lumière dans l'acte de la réfraction.

3° Les rayons qui composent le spectre sont *simples* et *indécomposables*, et à chaque couleur correspond un degré de réfrangibilité particulier.

Pour établir cette théorie, il faut prouver que : 1° l'épanouissement du faisceau et la forme allongée du spectre qui en résulte, ne peuvent être produits par des rayons également réfrangibles ; 2° les divers rayons colorés ont des réfrangibilités différentes allant en croissant, du rouge au violet ; 3° ils sont indécomposables par une nouvelle réfraction ; 4° tous les rayons colorés qui composent le spectre étant réunis et mélangés, forment de la lumière blanche. C'est ce que Newton a établi de la manière la plus évidente, au moyen de nombreuses expériences que nous allons passer en revue.

2026. I. L'allongement du spectre est incompatible avec l'égale réfrangibilité des rayons. — Quand un faisceau conique de rayons tous *également réfrangibles* traverse un prisme placé dans la position du minimum de déviation du rayon qui forme l'axe du cône, la section droite du faisceau émergent présente sensiblement la même forme que celle du faisceau incident. Soit *s* (*fig.* 1535) le faisceau incident formant un cône droit ; nous allons d'abord prouver que l'angle *s'* formé par les rayons émergents qui limitent le faisceau dans la section droite du prisme, est égal à l'angle *s*. En effet, en appelant *a*, *a'*, et *c*, *c'* les angles que font avec les faces du prisme, les rayons

incidents et émergents qui forment les angles s et s', nous aurons $s = a' - a$ et $s' = c - c'$; et pour que s' soit égal à s, il suffit que l'on ait $a = c$ et $a' = c'$. Or, le rayon qui forme l'axe du cône incident étant dans la position du minimum de déviation, la partie incidente et la partie émergente de ce rayon sont également inclinées sur les faces du prisme (1973), et l'on aura aussi, sensiblement, $a = c$ et $c' = a'$; puisque, dans le voisinage du minimum, de petites variations dans l'angle d'incidence n'en apportent que de très faibles dans la déviation ; ce que l'expérience montre d'ailleurs, puisqu'on peut faire tourner légèrement le prisme sur lui-même sans que la déviation minimum change d'une manière appréciable. Les dimensions du faisceau émergent n'étant pas sensiblement modifiées dans un plan parallèle aux arêtes du prisme, la forme de l'image r' sera la même que celle de l'image directe r.

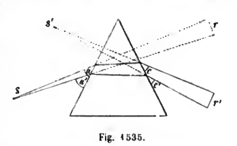


Fig. 1535.

Ce résultat peut se vérifier par l'expérience, en interposant dans le faisceau incident une lame de verre rouge, qui ne laisse passer que des rayons également réfrangibles : l'image du trou circulaire du volet se projette sur un écran sous la forme d'un cercle, quand le prisme est dans la position du minimum de déviation, mais si l'on vient à le faire tourner, on voit l'image s'allonger dans

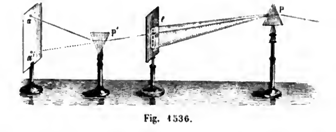


Fig. 1536.

le plan de réfraction quand le faisceau incident se relève vers le sommet, et s'aplatir, quand le faisceau s'abaisse vers la base. — On peut aussi expérimenter en regardant un corps sphérique à travers le prisme et la lame de verre rouge ; ce corps paraît rond dans la position du minimum de déviation, allongé quand les rayons qui entrent dans l'œil s'abaissent vers la base, et aplati quand ces rayons sont relevés vers le sommet ; c'est le contraire de ce qui a lieu quand on reçoit l'image sur un écran (1968).

Nous devons conclure de ce qui précède que, le spectre solaire étant allongé

dans la position du prisme qui donne la déviation minimum, le faisceau incident ne peut être composé de rayons également réfrangibles.

2027. II. Les divers rayons colorés sont inégalement réfrangibles. — Pour établir ce principe, Newton a multiplié les expériences. 1° On isole un très mince pinceau de rayons sortant d'un prisme P (*fig.* 1536), en faisant tomber le spectre *e* sur un écran percé de petits trous. Ces trous sont fermés par des lames à coulisse, excepté celui qui doit laisser passer le pinceau que l'on veut isoler. Ce pinceau traverse un second prisme P′ qui le dévie vers sa base, et que l'on place de manière à obtenir le minimum de déviation. La distance *aa′* de l'image *a* projetée sur un écran, à l'image directe *a′* que forme le rayon quand le prisme est enlevé, sert de mesure à la déviation. En opérant ainsi avec les rayons de différentes couleurs, on trouve que la distance *aa′* est plus grande pour les rayons violets que pour tous les autres, et va en diminuant du violet au rouge, pour lequel elle est la plus petite.

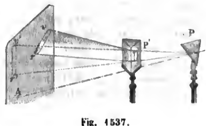


Fig. 1537.

2° On prouve encore l'inégale réfrangibilité des rayons colorés, par l'expérience des prismes croisés. Le spectre, formé par le prisme P (*fig.* 1537), est reçu sur un second prisme P′, perpendiculaire au premier. Les rayons sont de nouveau déviés par le prisme P′, et le spectre *r′v′* est rejeté du côté de sa base, en *rv*, et *obliquement*, de manière que l'extrémité violette *v* se trouve plus éloignée du spectre direct *r′v′*, que l'extrémité rouge *r* ; ce qui prouve que les rayons violets ont été plus déviés par le second prisme que les autres rayons. Les bords du spectre ainsi déplacé étant rectilignes, on en conclut que la réfrangibilité des rayons colorés croît d'une manière continue du rouge au violet, comme on pouvait le prévoir, puisque les couleurs se fondent les unes dans les autres. De plus, si le second prisme P′ est identique avec le premier, et si les rayons entrent sous la même incidence, les distances *v′v* et *r′r* sont égales aux distances A*v′*, A*r′* qui séparent les extrémités *v′*, *r′* du spectre direct, du point A où se formerait l'image directe de l'ouverture du volet, si les deux prismes étaient enlevés ; ce qui montre que la réfrangibilité de chaque rayon n'est pas changée par son passage à travers le premier prisme.

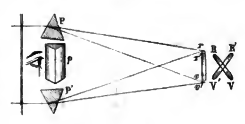


Fig. 1538.

Newton a donné à cette expérience une forme encore plus piquante : il superpose sur un même écran, deux spectres inverses *rv*, *v'r'* (*fig.* 1538) formés par deux prismes égaux P, P' recevant chacun un pinceau de rayons solaires ; puis regardant ce double spectre avec un troisième prisme *p* perpendiculaire aux deux autres, il voit les deux spectres, déplacés vers le sommet de ce troisième prisme (1968), et croisés comme on le voit en RV, R'V'.

Les expériences qui précèdent montrent bien que la coloration du faisceau dispersé n'est pas due à une action exercée sur la lumière par la substance du prisme, puisque le second prisme ne produit pas un effet semblable, le spectre déplacé n'étant pas étalé dans le plan de réfraction.

3° Newton a encore prouvé l'inégale réfrangibilité des rayons, au moyen de la réflexion totale. L'angle limite θ étant lié avec l'indice de réfraction *n*, par la formule $\sin\theta = 1 : n$ (1949), cet angle doit être d'autant plus petit que les rayons sont plus réfrangibles. Voici comment l'expérience se fait : on prend un prisme de verre ABC (*fig.* 1539) dont l'angle A est droit, et les deux autres, égaux à 45° ; on fait tomber sur l'une des petites faces, un pinceau de rayons, *s*, qui donne un spectre *vr* ; puis, inclinant peu à peu le prisme, de manière à augmenter l'angle du rayon *sn* avec la normale à la face CB, on rend cet angle sensiblement égal à l'angle limite. Or, l'angle limite étant, pour le verre, de 41° environ, on voit que le rayon incident sera alors sensiblement perpendiculaire à la face AC, qu'il traversera sans déviation et par conséquent sans dispersion, et tous les rayons colorés qui la composent tomberont sur la face CB sous la même incidence. Cependant, ils ne commencent pas à éprouver au même moment la réflexion totale ; les rayons violets l'éprouvent les premiers, puis les rayons indigos, bleus, etc., et ces rayons disparaissent successivement dans le spectre *rv*. Pour en constater la présence dans le rayon qui émerge en *e*, on le reçoit sur un second prisme *abc*, qui forme un spectre pâle *r'v'* à cause d'un peu de lumière blanche réfléchie à la surface BC. Mais, dès que les rayons violets, indigos bleus.... disparaissent successivement dans le spectre *rv*, on les voit apparaître avec un vif éclat dans le spectre *r'v'*, à leur place ordinaire. Newton désignait ce phénomène sous le nom d'inégale *réflexibilité* des rayons.

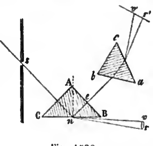


Fig. 1539.

4° De peur qu'on n'attribuât l'inégale réfrangibilité, à une modification que les rayons auraient éprouvée par l'action du verre, Newton a constaté l'inégale réfrangibilité de rayons qui n'avaient pas traversé un premier prisme. Pour cela, il a placé parallèlement aux arêtes du prisme ABC (*fig.* 1540), une bande de papier *Br* bien éclairée, dont une moitié, *b*, était bleue, et l'autre, *r*, rouge. Ayant regardé cette bande à travers le prisme, il vit les deux moitiés,

séparées l'une de l'autre; la partie bleue, b', était plus relevée vers le sommet que la partie rouge, r'; ce qui prouve que les rayons envoyés par la bande bleue, arrivent dans l'œil après avoir été plus déviés que les rayons rouges. L'expérience peut se faire avec deux autres couleurs, et les deux parties de la bande sont d'autant plus écartées, que ces couleurs sont plus éloignées l'une de l'autre dans le spectre.

5° Ayant tendu quelques fils noirs sur les deux parties colorées vivement éclairées, Newton reçut sur un écran l'image de ces bandes formée par une lentille, et reconnut que les images des fils noirs sur les deux parties colorées ne peuvent être nettes en même temps; l'écran doit être plus rapproché pour la partie bleue que pour la partie rouge; ce qui montre que les rayons bleus font leur foyer plus près que les rayons rouges.

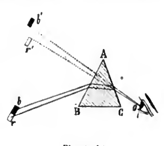


Fig. 1540.

Newton a encore opéré en éclairant une page imprimée, avec les rayons du spectre, et cherchant la position de l'image focale formée par les rayons réfléchis diffusément par le papier. Il trouva que l'écran devait être plus près de la lentille pour voir nettement l'image des caractères éclairés par la partie violette du spectre, que pour voir l'image de ceux qui étaient éclairés par la partie rouge. Il est essentiel d'opérer dans une chambre complètement obscure, pour que la feuille imprimée ne reçoive pas d'autre lumière que celle du spectre.

2028. Aberration de réfrangibilité des lentilles. — Il résulte de ce qui précède, que les rayons qui traversent une lentille se décomposeront par réfraction, et que les différents rayons colorés ne formeront pas leur foyer à la même distance, même avec une lentille *aplanétique*. Il résulte de là, dans les images focales, un défaut de netteté désigné sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*, et l'on nomme lentilles *achromatiques*, des systèmes de lentilles dans lesquelles on est parvenu à le corriger.

2029. III. Les rayons du spectre sont simples. — Quand on reçoit sur un prisme P′ (*fig.* 1536) un pinceau coloré séparé par l'écran *e*, du faisceau dispersé par le prisme P, on remarque que ce faisceau est dévié en *a* sans éprouver de nouvelle coloration, et l'image *a* conserve la forme de l'ouverture de l'écran, si le prisme P′ donne la déviation minimum. Newton a conclu de là que les rayons colorés du spectre sont *simples* et *homogènes*. Cette conclusion a d'abord été attaquée par plusieurs physiciens, parmi lesquels on est étonné de trouver Mariotte. C'est qu'on ne prenait pas assez de précautions pour éviter tout mélange de rayons diversement colorés en un même point du spectre. Des expériences faites avec plus de soin confirmèrent celles de Newton. Depuis, on a soutenu que, si les rayons colorés ne peuvent être

décomposés par la réfraction, ils peuvent l'être par l'absorption de quelques-unes de leurs parties, quand ils traversent certains milieux colorés; mais nous verrons plus loin (2051) que l'opinion de Newton, qui regardait les rayons colorés du spectre comme simples et homogènes, est sortie victorieuse des nombreuses épreuves auxquelles elle a été soumise dernièrement, et qu'il faut admettre, avec ce grand physicien, que la couleur des rayons est liée à la réfrangibilité ; chaque rayon coloré correspondant à une réfrangibilité particulière.

2030. IV. Le mélange des couleurs du spectre forme du blanc. — Newton a fait un grand nombre d'expériences pour réunir les couleurs du spectre solaire, soit en ramenant au parallélisme les rayons divergents qui le forment, soit en les rassemblant en un même point :

1° On reçoit le faisceau *s* dispersé par un prisme P (*fig.* 1541), sur un second prisme P′ de même angle et de même substance, mais ayant son sommet tourné du côté opposé à celui du premier. Les deux prismes doivent être assez près l'un de l'autre pour que le second reçoive le faisceau tout entier.

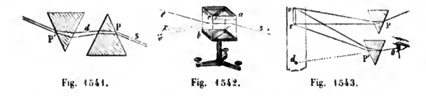


Fig. 1541. Fig. 1542. Fig. 1543.

Les rayons sont alors ramenés au parallélisme, et forment un faisceau de lumière blanche. Si les prismes n'ont pas exactement le même angle et ne sont pas de même substance, on arrive encore au même résultat quand les différences sont peu prononcées, en donnant au second prisme une position convenable. — On peut encore prendre une cuve rectangulaire en verre *ab* (*fig.* 1542), partagée en deux par une cloison diagonale *cc′* ; on verse de l'eau dans un des compartiments *acc′*, et l'on fait passer un faisceau *s* à travers le prisme formé par la cloison et par l'une des faces, *ac′*. Ce faisceau donne un spectre *rv* ; mais le faisceau est ramené en *e*, à sa forme cylindrique et à sa blancheur primitive, dès qu'on remplit d'eau le second compartiment, qui forme un prisme dont l'angle est opposé à celui du premier.

Enfin, au lieu de faire passer le faisceau dispersé à travers un second prisme, on peut recevoir le spectre *rv* (*fig.* 1543) sur un écran blanc, et le regarder à travers un second prisme P′ placé très près du premier, et ayant son sommet tourné du même côté ; en tournant peu à peu le prisme P′, on finit par apercevoir une image blanche *d*. On se rend facilement compte de ce résultat, en remarquant qu'un rayon de lumière blanche venant de *o* fournirait le spectre *rv* après avoir traversé le prisme P′. Or, les rayons doivent suivre la même route quand ils viennent en sens contraire, des différents points de *rv* ;

ils se confondent donc et forment le faisceau blanc *o*. Pour réussir, il faut que l'obscurité soit complète, afin que le spectre *rv* ne reçoive pas de lumière étrangère. Si le prisme P est assez long, on peut regarder le spectre à travers une section différente de celle que traversent les rayons qui le forment, et l'on aperçoit une image blanche.

2° On recompose la lumière blanche en rassemblant en un même point les rayons colorés qui forment le spectre. On peut se servir pour cela d'une lentille *rv* (*fig.* 1544) assez grande pour recevoir tout entier le faisceau dispersé par le prisme P. Les rayons qui ont traversé la lentille se croisent en F, foyer conjugué du point *e*, et continuent leur route en produisant un second spectre *r'v'* renversé par rapport à *rv*; ce qui montre que les rayons colorés ne se modifient pas au foyer, et que chacun d'eux conserve ses qualités en se mélangeant aux autres. Il en est encore de même quand ces rayons se réfléchissent en F; car si l'on place en ce point un petit miroir plan, on obtient un spectre *r"v"* symétrique de *r'v'* par rapport au plan de ce miroir. Les différents rayons colorés ne forment pas leur foyer au même point, mais dans un espace assez petit; si l'on place un écran blanc dans cet espace, chaque couleur est réfléchie diffusément et se mêle ainsi aux autres, de manière à donner une tache blanche, entourée cependant d'une auréole violette provenant des rayons qui font leur foyer le plus près de la lentille.

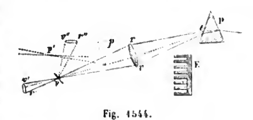


Fig. 1544.

Si l'on intercepte, avec une règle parallèle aux arêtes du prisme, quelques-unes des couleurs du spectre, l'image focale F reçue sur un écran blanc n'est plus blanche, et sa couleur change quand on déplace la règle. Pour intercepter des couleurs non contiguës, on emploie un écran découpé E. Si l'on imprime à cet écran un mouvement de va et vient très rapide, l'image focale paraît blanche; c'est que l'impression faite dans l'œil ayant une durée d'environ $\frac{1}{10}$ de seconde, les couleurs se succèdent assez rapidement au foyer pour que les impressions subsistent simultanément.

Tous ces résultats peuvent s'obtenir également au moyen d'un miroir sphérique concave.

3° On peut encore rassembler en un même point les rayons dispersés par un prisme, au moyen de 7 petits miroirs plans (*fig.* 1545) pouvant tourner autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal, et être rapprochés plus ou moins les uns des autres sur la barre *ab*. On les place et on les incline de manière que chacun d'eux reçoive une des couleurs principales du faisceau dispersé, et que les 7 faisceaux réfléchis se croisent en un même point, où ils forment de la lumière blanche.

4° La durée des impressions produites dans l'œil a suggéré à Newton l'expérience suivante : on divise un disque de carton en 7 secteurs peints des couleurs du spectre, et d'étendue convenable. Quand on fait tourner rapidement ce disque, il paraît blanc. — Les couleurs s'altérant peu à peu, au bout de quelque temps le résultat cesse d'être satisfaisant. Il faut alors diminuer l'étendue de la couleur qui domine, au moyen de bandes de papier noir. M. Dubosc a imaginé d'employer des secteurs en verre coloré ou en gélatine, à travers lesquels on regarde la lumière des nuées. Cette lumière conserve sa blancheur pendant le mouvement de rotation. — On peut alors mettre le disque dans un faisceau de rayons solaires divergents, obtenus avec une lentille ; les secteurs se peignent sur un écran éloigné, et l'image devient blanche pendant la rotation. Musschenbroeck expérimentait avec une toupie dont la surface était divisée suivant les méridiens, en 7 parties peintes.

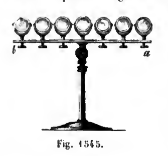


Fig. 1545.

5° Newton a cherché à obtenir la couleur blanche, en mélangeant des poudres, colorées des principales nuances du spectre ; mais il restait toujours une teinte grise. Cela tient à ce que les poudres absorbent beaucoup de lumière, et l'effet est le même que celui que produisent les corps blancs faiblement éclairés, qui paraissent gris, et d'autant plus que le jour est plus faible. Pour confirmer cette explication, Newton éclaira par les rayons solaires, un mélange de poudres d'orpiment, de pourpre, d'azur et de vert-de-gris ; à côté de ce mélange était placée, mais à l'*ombre*, une feuille de papier blanc. Le papier paraissait gris et la poudre, d'un blanc éclatant.

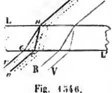


Fig. 1546.

2031. Explication de quelques phénomènes. — Quand un faisceau de rayons lumineux traverse un milieu incolore terminé par des plans parallèles, il sort sans présenter de coloration, quoiqu'il éprouve la dispersion dans l'intérieur du milieu. Cela tient à ce que tous les rayons émergents sont parallèles aux rayons incidents dont ils proviennent (1965). Considérons, par exemple, un faisceau de lumière blanche A*a* (*fig.* 1546) tombant sur une lame de verre LL'. Un rayon *a* sera décomposé dans l'intérieur de la lame en un faisceau coloré très mince *nec*, et formera à sa sortie un pinceau cylindrique *rv*, dans lequel seront distribués des rayons de toutes les couleurs. Mais le rayon voisin, *a'*, fournira un rayon rouge qui, tombant dans l'espace *ec*, se superposera au rayon orangé provenant de *a*. De même, le rayon *a''* formera un rayon rouge qui se superposera au rayon jaune de *a* et au rayon orangé de *a'* ; de sorte qu'à une distance insensible du bord *er* du faisceau émergent, on aura toutes les couleurs superposées, et par conséquent de la lumière blanche. Les bords *r* et V du

faisceau rV présenteront des rayons colorés séparés; mais ces rayons seront parallèles et se trouveront distribués dans un espace tellement petit *rv*, que les couleurs seront insensibles, à moins que la lame ne soit très-épaisse. — On peut observer la décomposition qui se fait dans l'intérieur de la lame, en faisant tomber très obliquement un très mince pinceau de rayons solaires sur une couche d'huile de cassia placée dans une auge en verre à faces bien parallèles ; on distingue facilement la dispersion produite par la première réfraction, avant que les couleurs ne se réunissent à la seconde.

On voit que la recomposition de la lumière dispersée en dedans, a lieu à l'émergence, parce que les rayons réfractés font des angles égaux avec les faces d'entrée et de sortie; cette recomposition aurait donc eu lieu, si, cette condition étant remplie, les faces n'étaient pas parallèles ; cette remarque va nous servir à expliquer l'expérience suivante.

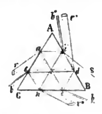


Fig. 1547.

Expérience de Charles. — On fait tomber sur un prisme *équilatéral* ABC (*fig.* 1548) un pinceau de rayons solaires, *si*, dans la direction du minimum de déviation, et en un point *i* situé au tiers du côté AB. Ce pinceau donne d'abord un spectre *r*; une partie du pinceau réfracté *ia* se réfléchit en *a* suivant *ac* parallèle à AB, et donne un pinceau émergent *cb*, parfaitement blanc. C'est que le pinceau *ac* étant la continuation de *ia*, et rencontrant la face CB le violet en dessous, et en faisant avec elle le même angle que *ia* avec la face AB, le pinceau brisé *iac* est dans le même cas que s'il traversait un milieu terminé par deux faces parallèles. Les rayons émergents *cb* forment donc un pinceau cylindrique. Une réflexion partielle en *c* donne un faisceau *cd* qui émerge en *d* et produit un second spectre *r'*. Le pinceau réfléchi *de* ayant le violet en dessous par rapport à la face AC, donne le pinceau blanc *eb'*, et en même temps le pinceau réfléchi *en* qui donne lieu au spectre *r"*. Enfin, la portion de lumière qui se réfléchit en *n* donne le faisceau blanc *b"*, et en *i*, il se fait une réflexion partielle qui donne un pinceau qui se confond avec *ia*, de manière que les rayons qui émergeront ou se réfléchiront ne feront que reproduire les images déjà formées. — Ces résultats se vérifient par l'expérience, et l'on remarque que les images *r*, *b*, *r'*, *b'*... sont de plus en plus faibles. Comme les deux images *r* et *b'* sont très peu éloignées l'une de l'autre comparativement à leur distance au prisme, on peut trouver le minimum de déviation dans le cas du prisme isocèle, en le faisant tourner jusqu'à ce que ces deux images se rencontrent.

Franges irisées des corps vus à travers un prisme. — Quand on regarde une ligne lumineuse, ou une ligne blanche éclairée sur un fond noir, à travers un prisme qui lui soit parallèle, on aperçoit un spectre dont le violet se trouve du côté du sommet. C'est que la ligne doit être considérée comme formée de lignes superposées présentant les diverses couleurs du spectre, et donnant des images d'autant plus relevées vers le sommet que les rayons

colorés qu'elles émettent sont plus réfrangibles (2027). C'est par ce moyen que l'on peut obtenir le spectre de faibles sources lumineuses. Les étoiles donnent ainsi des spectres brillants, qu'on ne pourrait obtenir par projection sur un écran.

Quand la ligne blanche est remplacée par une large bande, les deux côtés parallèles aux arêtes du prisme sont bordées de couleurs irisées, le violet terminant le bord tourné du côté du sommet du prisme, et le rouge, le bord opposé. Entre ces bords irisés se trouve le fond blanc de la bande. Les côtés perpendiculaires aux arêtes du prisme ne sont pas colorés. Ici on doit considérer tous les éléments linéaires de la bande, parallèle aux arêtes, comme formant autant de spectres. Ces spectres se superposent à une certaine distance des bords, et il y a en chaque point toutes les couleurs superposées, ce qui produit du blanc. Mais près du bord qui se trouve du côté du sommet, le premier spectre n'est recouvert qu'en partie par les suivants ; de sorte que l'on a d'abord du violet pur, puis le violet du spectre suivant mêlé avec l'indigo du premier, puis le violet du troisième mêlé au bleu du premier et à l'indigo du second... et ainsi de suite jusqu'au point où commence le blanc. Au bord opposé, on a du rouge, puis du rouge mêlé à de l'orangé, puis ces deux nuances mêlées à du jaune..... Si la bande n'est pas suffisamment large, la partie blanche pourra ne pas exister, et la bande sera colorée dans toute son étendue. Si la bande est noire sur un fond blanc, c'est le fond qui donne des couleurs, et elles sont évidemment en ordre inverse.

Quand la bande possède une couleur propre, on a encore des franges, mais présentant des couleurs qui dépendent du mélange de rayons qui donne la couleur du corps. Si la bande est assez large, il y a entre les deux bords irisés un espace présentant cette couleur.

Quand la bande est très longue, elle a la forme d'un arc dont la convexité est du côté de la base du prisme. C'est que les rayons qui partent des extrémités passent obliquement, et sont dans le même cas que s'ils traversaient un prisme à angle plus grand ; ils sont donc plus déviés, ce qui les fait paraître plus relevés vers le sommet.

Quand on regarde une flamme à travers un morceau de verre taillé à facettes, tout rayon qui passe par deux faces formant un angle, donne un spectre, comme s'il avait traversé un prisme. Chacun des prismes que l'on peut imaginer en considérant les facettes deux à deux, donne ainsi une image particulière frangée de vives couleurs. C'est ainsi que se forment ces couleurs irisées que l'on voit dans ces petites masses de verre taillé que l'on suspend aux lustres ; à la vive lumière du soleil, leur effet serait bien plus brillant. Les diamants produisent des effets analogues.

2032. MANIÈRE D'ISOLER LES RAYONS DU SPECTRE. — Plusieurs expériences de dispersion doivent, pour réussir, être faites avec un spectre dont les couleurs soient bien séparées les unes des autres ; aussi Newton a-t-il cherché avec soin les moyens de remplir cette condition ; et il a prescrit les règles suivantes :

1° Il faut employer un prisme en verre pur et exempt de stries, et lui donner un grand angle (2024). On forme un prisme bien homogène, en remplissant un prisme creux en glaces avec du sulfure de carbone, liquide qui forme un spectre très allongé. Mais il faut éviter les inégalités de température dans la masse liquide.

2° Le faisceau incident doit être très mince perpendiculairement aux arêtes du prisme. En effet, si nous considérons deux rayons *a* et *a'* (*fig.* 1548), chacun d'eux forme un spectre particulier *rv*, *r'v'*, ces spectres se superposent et leurs couleurs se mêlent dans la partie *r'v*. On voit que les deux spectres sont d'autant plus près de coïncider que l'épaisseur *aa'* est moindre. Les rayons compris entre *a* et *a'* donnent, de même, des spectres qui viennent mêler leurs couleurs à celles des spectres extrêmes *rv*, *r'v'*. En considérant en particulier l'espace *nco*, *n* étant le point où le rayon violet du faisceau *arv* coupe le rayon rouge du faisceau *a'r'v'*, on verra qu'en chaque point de cet espace il passe un rayon de chaque couleur, et que, par conséquent, cet espace est blanc : en effet, si l'on rapproche peu à peu le rayon *a* du rayon *a'*, le spectre *rv* empiètera de plus en plus sur le spectre *r'v'*, et se confondra avec lui quand le rayon *a* coïncidera avec le rayon *a'*.

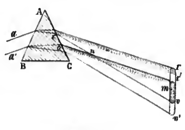


Fig. 1548.

Pendant ce mouvement, les différents rayons colorés qui forment le spectre *rv* passent successivement par le point *n* ou par tout autre point de l'espace *nco*. Or, le résultat sera le même, si, au lieu d'un rayon mobile de *a* en *a'*, on considère les rayons fixes qui remplissent toute l'épaisseur *aa'*.

Les faisceaux cylindriques, rouge, *rr'*, et violet *vv'* (*fig.* 1548), divergeant entre eux, plus l'écran sera éloigné, plus le spectre qu'il reçoit sera pur. Par exemple, jusqu'en *n*, du rouge se mêle au violet, tandis qu'en *rv'*, ces deux couleurs sont isolées de celles de la partie moyenne du spectre. Il faut donc placer l'écran loin du prisme.

4° Les rayons incidents ne doivent pas être divergents. En effet, supposons qu'ils divergent en formant un cône droit, et que le prisme soit placé de manière à donner la déviation minimum. Les rayons de chaque couleur formeront un cône qui produira sur un écran éloigné une image arrondie (*fig.* 1549). Par exemple, les rayons rouges et les rayons violets formeront les images *rv*, *r'v'*, d'autant plus écartées que l'écran est plus éloigné, et d'autant plus rapprochées, pour une même distance, que l'angle du cône incident est plus grand. On voit donc que, moins le faisceau sera divergent, plus les images seront petites, et plus les couleurs en chaque point seront homogènes ; comme on le voit en AB et *ab*. — On peut calculer le nombre de couleurs qui passeront par un point donné, si l'on connaît le rayon *r* de chaque image et la longueur totale *l* du spectre, et

si l'on suppose que les centres des cercles correspondants aux 7 couleurs sont également espacés. En effet, tous les cercles dont les centres sont à des distances du point donné moindre que r apportent leur couleur en ce point. Or, les centres qui satisfont à cette condition occupent un espace $2r$; et comme tous les centres sont distribués sur une longueur totale $l-2r$, on voit que le nombre des cercles qui se superposent, au point donné, est proportionnel à $\frac{2r}{l-2r}$; valeur positive, puisque l est toujours plus grand que $2r$, d'autant plus petite que r est lui-même plus petit, et nulle pour $r=0$, comme on pouvait le prévoir.

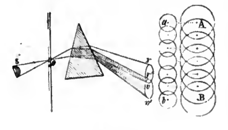


Fig. 1549.

5° Le diamètre apparent du corps lumineux qui fournit le faisceau incident doit être aussi petit que possible; car, le faisceau incident passant par une très petite ouverture o, est d'autant plus divergent que le diamètre apparent est plus grand. Par exemple, s'il s'agit du soleil, ce faisceau forme un cône dont l'angle au sommet est de 30'. De plus, il y a autour de chaque image colorée une pénombre qui rend confus les contours de chaque cercle coloré, et qui est d'autant plus étendue que le diamètre apparent est plus grand. On peut diminuer la divergence des rayons solaires, en faisant passer le faisceau à travers deux ouvertures étroites; mais le spectre est alors peu brillant. Pour en obtenir un très lumineux et à couleurs bien séparées, Newton fait tomber un faisceau rectangulaire large et épais sur une lentille à très long foyer L (*fig.* 1550) placée très près du prisme P, et dispose au foyer, un écran blanc sur lequel chaque couleur produit un *focus* très brillant et très étroit. Il vaut mieux encore employer une lentille cylindrique parallèle aux arêtes du prisme, et qui donne pour chaque couleur, une bande focale mince et bien séparée des autres. — M. L. Foucault a perfectionné cette méthode, principalement par l'addition entre le prisme et la lentille, d'un diaphragme qui arrête les rayons qui, passant trop près des bords de celle-ci, tendent à iriser chaque trait coloré. On voit aussi que le spectre est d'autant plus étalé que la lentille est placée plus près du prisme, qui alors est plus éloigné du spectre; l'écran devant être à une distance déterminée de la lentille.

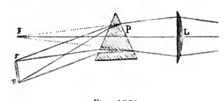


Fig. 1550.

Newton ayant obtenu un spectre bien pur, marqua et fit marquer par divers observateurs les points où paraissaient se faire les séparations des sept couleurs

entre elles; il trouva que les distances de ces points à un point situé au-delà de l'extrémité rouge et à une distance de cette extrémité égale à la longueur *l* du spectre, étaient entre elles comme les longueurs que devrait avoir une corde donnant le son *ut* avec la longueur $2l$, pour rendre les sons de la gamme mineure *ré*, *mi*♭, *fa*, *sol*, *la*, *si*, ut_2. Mais ce résultat n'était qu'accidentel et particulier au prisme dont se servait Newton, puisque l'espace relatif occupé par les différentes couleurs dépend de la substance du prisme (2024).

2033. Manière d'isoler un pinceau coloré. — Quand on veut un pinceau bien pur séparé des autres rayons colorés, on fait passer ce pinceau à travers l'ouverture d'un écran *e* (*fig.* 1414) ; on le reçoit sur un second prisme P′, et l'on fait passer l'image déviée *a* qui est un peu étalée pour peu que le pinceau ne soit pas homogène, à travers une ouverture *a*, qui ne laisse passer que des rayons purs, si l'on a soin d'éviter toute lumière étrangère. C'est sur un pinceau ainsi épuré qu'il faut opérer quand on veut constater que les rayons colorés du spectre sont simples.

II. Des raies du spectre.

2034. RAIES NOIRES DU SPECTRE SOLAIRE. — La lumière parut à Newton répartie dans toute l'étendue du spectre solaire, de manière qu'il y eût des rayons de tous les degrés de réfrangibilité entre le rouge et le violet extrêmes. Wollaston, en 1802, ayant regardé à travers un bon prisme en flint-glass, une fente très étroite éclairée par le soleil, aperçut dans le spectre formé par le trait lumineux, plusieurs raies noires très fines parallèles aux arêtes du prisme[1]. Quinze ans après, Fraunhofer, qui ne connaissait pas les observations de Wollaston, ayant voulu comparer les indices de réfraction des divers rayons colorés, chercha dans le spectre des repères qui pussent lui servir à viser toujours au même point. Il remarqua d'abord un trait jaune très brillant, dans le spectre formé par la lumière d'une lampe ; mais ce repère étant unique, il chercha s'il n'en existerait pas d'autres dans le spectre solaire. Il fit ses essais avec un prisme en flint bien pur, fixé à l'appareil (*fig.* 1525), et il vit le spectre strié transversalement, d'une multitude de raies très fines, sombres ou tout à fait noires ; il put en compter 500 à 600, et ce nombre était d'autant plus grand que la lunette grossissait davantage. Ces raies sont réparties irrégulièrement dans toute l'étendue du spectre, et ne tombent pas généralement aux limites, d'ailleurs très indécises, des couleurs principales. Pour se reconnaître au milieu de cette confusion, Fraunhofer remarqua 8 raies principales, faciles à distinguer par leur position et leur intensité ; il les désigna par les premières lettres de l'alphabet, en commençant par l'extrémité rouge du spectre. La figure 1551 représente les 8 raies principales de Fraunhofer, avec

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et Arts), t. XXVI, p. 239.

une multitude d'autres ; les unes forment des groupes serrés, les autres sont plus ou moins espacées et distribuées très inégalement dans les différentes couleurs. Parmi ces raies, il en est encore deux à remarquer : l'une dans le rouge *a*, formée de 8 lignes fines, l'autre située en *b* dans le vert, près de E, et formée de trois lignes fines dont les deux plus fortes sont séparées par un espace brillant.

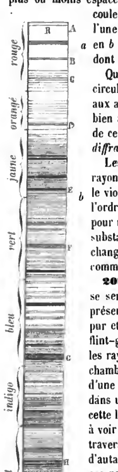


Fig. 1551.

Quand la fente lumineuse est remplacée par un petit trou circulaire, les raies conservent leur forme rectiligne parallèle aux arêtes du prisme ; d'où l'on conclut qu'elles appartiennent bien à la lumière même, et qu'elles ne sont pas dues à un de ces effets que nous étudierons plus tard sous le nom de *diffraction*.

Les raies du spectre solaire montrent qu'il n'y a pas de rayons de tous les degrés de réfrangibilité entre le rouge et le violet ; il y a une multitude de petites lacunes. L'aspect, l'ordre et les rapports de distance des raies restent les mêmes pour une même source de lumière et pour un prisme de même substance, quel que soit son angle. Si la substance du prisme change, les distances relatives des raies sont seules modifiées, comme les espaces occupés par les diverses couleurs.

2035. Manière d'observer les raies. — Il faut d'abord se servir d'un prisme bien homogène, exempt de stries, et présentant un angle assez grand pour que le spectre soit bien pur et bien étalé. On emploie ordinairement un prisme en flint-glass, ou en cristal de roche. On fait tomber sur ce prisme les rayons solaires, ou la lumière du ciel entrant dans la chambre noire par une fente étroite, ou partant du foyer d'une lentille cylindrique, et l'on reçoit le faisceau dispersé, dans une lunette grossissante bien achromatique. On dispose cette lunette, en enfonçant plus ou moins l'oculaire, de manière à voir nettement le trait lumineux, que l'on vise ensuite à travers le prisme ; les raies sont grossies, et l'on en distingue d'autant plus que la lunette est plus forte. Si la lunette n'est pas parfaitement achromatique, il faut la raccourcir un peu plus pour voir les raies qui sont dans le violet que pour apercevoir celles qui se trouvent dans le rouge. La position du prisme la plus favorable est celle qui donne le minimum de déviation. Si l'on augmente l'angle d'incidence, les raies disparaissent, et, pour les retrouver, il suffit de raccourcir un peu la lunette ; si l'on diminue cet angle, les raies disparaissent encore, et pour les retrouver, on doit allonger légèrement la lunette. Le trait lumineux ne doit avoir que 1 à 2^{mm} d'épaisseur pour qu'on puisse voir les plus fortes raies, et que $\frac{1}{4}$ de millimètre, pour les plus fines.

Il existe des raies au-delà de la ligne A dans le rouge, et au-delà du violet. Les premières ont été observées par M. Brewster dans un espace égal à la distance AB (*fig.* 1551); les autres par M. Herschel dans un espace de couleur gris-lavande, qui s'étend au-delà du violet. Pour apercevoir ces raies, il faut employer des précautions multipliées; entr'autres intercepter tous les rayons autres que les rayons rouges ou violets, et tapisser de velours noir l'intérieur de la lunette. M. Brewster rendait sa vue plus perçante en dissolvant, au moyen du gaz ammoniac, le fluide trop épais qui lubrifie la surface de l'œil. Au moyen de ces précautions, et en employant un prisme d'huile de cassia, qui disperse beaucoup la lumière, il a pu distinguer jusqu'à 2000 raies.

Fraunhofer déterminait les distances angulaires des raies en mesurant les déviations qui leur correspondaient, au moyen de son appareil (*fig.* 1525), à la place duquel on peut aussi employer le goniomètre de M. Babinet. Fraunhofer a encore mesuré les distances absolues des raies, au moyen d'une lunette à réticule, pouvant glisser sur une règle parallèle au spectre, de manière à recevoir successivement les différentes couleurs. Une vis micrométrique indiquait les distances des raies, que l'on faisait coïncider successivement avec le fil de la lunette.

On peut observer à l'œil nu les principales raies. Voici les précautions que prend M. F. Bernard pour en distinguer plus de cent : les rayons solaires réfléchis par une glace, entrent dans la chambre noire, par une fente verticale de 1^{mm} de largeur au plus. On place l'œil à 3 mètres environ de la fente et très près d'un prisme bien vertical que l'on fait tourner peu à peu. Quand on approche du minimum de déviation, les raies apparaissent nettement. Pour distinguer celles du violet, il faut mettre l'œil très près du sommet du prisme, et il faut que le spectre soit vivement éclairé ; la lumière du disque solaire légèrement voilé par des nuages, convient très bien pour cela. Pour distinguer les raies des autres couleurs, il faut se rapprocher du minimum de déviation et employer une lumière moins vive; la lumière du ciel, passant directement par la fente, convient bien alors. Du reste, la position la plus favorable du prisme n'est pas tout à fait la même pour les divers observateurs ; elle paraît dépendre de la conformation de l'œil.

On peut aussi distinguer une quarantaine des raies les plus prononcées, dans un spectre projeté sur un écran blanc en papier fin bien tendu, ou en verre dépoli. Les rayons solaires traversent deux fentes à 4 ou 5 mètres l'une de l'autre; immédiatement derrière la seconde, on place un prisme de flint dans la position du minimum de déviation, puis on le fait tourner peu à peu jusqu'à ce que les raies apparaissent distinctement sur l'écran placé à 1 ou 2 mètres du prisme. On peut aussi, comme l'a prescrit de Haldat; placer une lentille achromatique à long foyer derrière le prisme, pour avoir un spectre plus brillant[1].

[1] MM. Zantedeschi, Ragona, Wartmann ont observé, chacun de leur côté, des raies longitu-

2036. Usage des raies pour distinguer les lumières provenant de sources différentes. — Indépendamment de leur utilité dans la mesure des indices de réfraction (1868), les raies du spectre ont fourni à Fraunhofer un moyen original de distinguer les unes des autres les diverses sources lumineuses [1]. En effet, les raies changent d'aspect et sont distribuées différemment dans les spectres formés par différentes sources, tandis qu'elles conservent le même aspect et la même distribution dans les spectres formés par une même source; que les rayons qui en émanent arrivent directement au prisme, ou qu'ils y arrivent après avoir subi une ou plusieurs réflexions. Ainsi, la lumière solaire directe ou réfléchie par une surface blanche, la lumière des nuées, celle de la lune et des planètes, qui proviennent de la même source, donnent des raies disposées de la même manière. Par exemple, en regardant à travers un même prisme *Mars*, *Jupiter*, *Vénus*, on distingue les raies D, E, F disposées dans les mêmes couleurs, dans le même ordre et aux mêmes distances que dans le spectre solaire ; d'où l'on conclut que la lumière de ces astres est empruntée au soleil. — Fraunhofer, ayant observé à travers un prisme plusieurs étoiles de première grandeur, trouva encore des raies noires, mais distribuées autrement que dans le spectre solaire, et d'une manière différente quand on passe d'une étoile à une autre. Par exemple, on ne voit pas de raies dans le jaune et l'orangé de *Sirius* ; on en voit deux dans le bleu et une surtout très marquée dans le vert; *Pollux* a plusieurs lignes faibles, la ligne D occupe sensiblement la même place qu'avec la lumière solaire, etc. On conclut de là que les étoiles sont des sources de lumière indépendantes les unes des autres. Pour observer les raies des étoiles, il faut se placer dans une obscurité complète et élargir le spectre, qui est linéaire, au moyen d'une lentille cylindrique parallèle à sa longueur. M. W. Swan a imaginé un mode d'observation des plus commodes : il place le prisme derrière la partie non étamée du miroir fixe d'un sextant (1906), et amenant l'image de l'étoile réfléchie par les deux miroirs, sur une des raies observée à travers le prisme, il obtient immédiatement la déviation qui lui correspond.

2037. Influence des gaz colorés sur l'apparition des raies. — Quand un rayon de lumière traverse un gaz coloré avant de rencontrer le prisme, il

dinales dans le spectre, c'est-à-dire des raies perpendiculaires à celles de Fraunhofer. Mais MM. Knoblauch et Karsten ont montré que ce phénomène n'a rien de constant, que les positions de ces raies longitudinales dépendent de la distance du miroir qui réfléchit les rayons solaires, à la lentille, et de la distance de celle-ci au prisme; et enfin, qu'elles sont produites par des aspérités accidentelles des bords de la fente, et par les impuretés déposées sur la surface du miroir. Ayant enlevé le prisme et observé l'image focale de la fente, ils ont toujours observé des aspérités des bords, rétrécissant cette image, ou des parties sombres provenant d'une réflexion imparfaite, précisément aux points correspondants aux raies longitudinales. Ces parties plus étroites ou moins brillantes de la fente produisent naturellement des bandes sombres quand le prisme étale l'image de la fente. (*Bibl. de Gen.* (Arch. des Sc.), t. IX, p. 208.

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts), t. VI (1817), p. 21.

se manifeste de nouvelles raies noires ; les vapeurs d'acide hypo-azotique produisent à un haut degré ce phénoméne, observé d'abord par M. Brewster. Si l'on emploie la lumière d'une lampe, qui ne donne que des raies brillantes (2040), aussitôt que la vapeur colorée arrive dans le faisceau, on voit les parties violettes et bleues du spectre se couvrir de raies, ou plutôt de bandes très noires, qui s'étalent de plus en plus à mesure que la densité du gaz augmente, et finissent par se réunir, de manière à faire disparaître tous les rayons violets ; en même temps, des raies se montrent dans le jaune, et finissent par s'étendre jusque dans le rouge.

Le phénoméne présente une grande régularité quand on opére avec la vapeur d'iode ou de brome, et les raies ne sont pas distribuées de la même manière qu'avec l'acide hypo-azotique. Suivant M. Muller, elles apparaissent d'abord dans le vert et le jaune, puis dans l'orangé et le commencement du rouge ; elles ont l'apparence de cannelures ; les unes sont tout à fait noires, les autres forment des bandes sombres.

Si l'on opére avec la lumiére solaire et que l'on fasse passer la vapeur colorée de plus en plus dense devant la fente par laquelle entrent les rayons, les raies se manifestent aussitôt, faibles d'abord et difficiles à distinguer, puis elles noircissent et finissent par empêcher de distinguer les raies directes du spectre solaire. On remarque que ces deux systèmes de raies sont indépendants l'un de l'autre, excepté pour l'acide hypo-azotique avec lequel les deux systèmes coïncident, comme l'a constaté M. Brewster.

On pourrait croire que les raies produites par l'interposition d'un gaz peuvent servir à la mesure des indices de réfraction ; mais M. A. Weiss a constaté que leurs distances réciproques éprouvent, quand la densité du gaz varie, des changements qui peuvent aller jusqu'à 30″ ; cela tient à ce qu'elles s'élargissent plus du côté des rayons les plus réfrangibles, que du côté opposé. Quelques-unes des raies du spectre solaire s'élargissent aussi inégalement de chaque côté, quand le soleil s'approche de l'horizon.

2038. Spectre des corps incandescents. — M. Draper, ayant pris pour source lumineuse un fil de platine rendu incandescent par un courant électrique, remarqua que le spectre formé par un prisme en flint était entièrement dépourvu de raies. M. L. Foucault a fait une observation semblable sur la lumiére des charbons polaires de l'arc voltaïque portés au rouge blanc. De ces faits, vérifiés par Masson, on a conclu que les spectres des corps incandescents ne présentent pas de raies.

M. E. Robiquet a confirmé cette loi par des expériences faites sur 9 métaux différents[1]. Aprés avoir répété l'expérience de M. Draper sur un fil de platine incandescent, il a constaté que l'interposition de vapeurs colorées fait apparaître un certain nombre de raies. Cependant le chlore sec n'en fait pas naître, même quand il forme une couche de $4^m,50$. Les autres métaux, *fer*, *argent*,

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XLIX, p. 606.

or, *aluminium*, *cuivre*, *sodium*, *potassium*, *chrôme*, étaient volatilisés par un courant; puis on interrompait les communications pour ne pas avoir de lumière électrique, et l'incandescence des parcelles subsistait quelques instants, pendant lesquels on faisait l'observation. De ces expériences, M. E. Robiquet a conclu que les solides incandescents donnent un spectre sans raies, quand en se volatilisant ils ne produisent pas de vapeurs ou en produisent de transparentes incolores; mais si les vapeurs sont lourdes, colorées ou se condensent facilement, elles se comportent comme les gaz colorés, et l'on voit apparaître des raies sombres.

2039. De la cause des raies du spectre solaire. — L'apparition des raies sombres lors de l'interposition des vapeurs colorées, s'explique naturellement en admettant que ces vapeurs absorbent ou arrêtent certains rayons, comme le font tous les milieux colorés, ainsi que nous allons le voir (2043). On est donc conduit naturellement à attribuer les raies du spectre solaire, à l'absorption de certains rayons par l'air atmosphérique, gaz légèrement coloré, comme l'attestent les teintes pourprées qui colorent le disque du soleil, quand, étant près de l'horizon, ses rayons ont à traverser une grande épaisseur d'air. La couleur de l'air étant très faible, on conçoit que les raies soient très fines. Si cette explication est exacte, les raies devront être d'autant plus nombreuses et plus fortes que le soleil sera plus près de l'horizon; c'est, en effet, ce qui a lieu; on a remarqué que l'aspect des raies dépend de l'état de l'atmosphère, et M. F. Bernard a constaté que certaines d'entre elles, principalement celles qui sont dans le rouge, présentent une netteté remarquable, quand le soleil est près de l'horizon. Par contre, au sommet de hautes montagnes, les raies devraient être très faibles et peu nombreuses; il serait important d'en faire l'expérience.

M. Brewster, ayant remarqué la similitude de position des raies du spectre solaire et de celles qui se manifestent quand les rayons incidents traversent des vapeurs nitreuses, a supposé que certains rayons étaient absorbés par un milieu qui se comportait comme ces vapeurs; mais, comme il n'y a que peu de différence entre les raies directes, quand le soleil est rapproché ou éloigné de l'horizon, il a supposé que l'absorption avait lieu dans l'atmosphère solaire. M. Forbes puis M. Matthiessen ont soumis cette conjecture au contrôle de l'expérience : pendant une éclipse de soleil, ils ont observé le spectre produit par les rayons venant du bord de l'astre, pensant que ces rayons, traversant une plus grande épaisseur de l'atmosphère solaire, donneraient des raies plus prononcées; mais ils sont arrivés à un résultat négatif. Il est donc probable que c'est dans l'atmosphère terrestre qu'a lieu l'absorption. Nous verrons (2043) une autre explication très originale de ces raies.

2040. RAIES BRILLANTES DU SPECTRE DES FLAMMES. — Le spectre des flammes présente des raies brillantes qui se détachent plus ou moins nettement par leur éclat sur le fond que forme le spectre; elles présentent généralement les couleurs du spectre au même point, et semblent produites par des espaces étroits dans lesquels les rayons sont plus vifs que dans les parties voisines, où il en manque

un grand nombre. Les raies brillantes doivent donc toujours être moins intenses que la lumière incidente ; cependant on a cru remarquer dans certains cas, des raies plus brillantes que la lumière incidente. Si le fait est vrai, s'il n'y a pas eu quelque illusion, il est actuellement inexplicable.

M. W. Swan a étudié spécialement les raies des flammes formées par les carbures d'hydrogène[1] ; il a d'abord constaté que la partie blanche et brillante de la flamme donne un spectre continu, dans lequel on remarque une raie brillante ayant la même réfrangibilité que la raie D du spectre solaire. La partie bleue de la flamme donne un spectre où le violet et le rouge manquent presque complètement et qui est traversé par de larges bandes obscures. Pour étudier ces divers spectres, M. Swan a employé la flamme de la lampe à gaz de M. Bunsen, dans laquelle le gaz est mêlé à l'air en arrivant à l'orifice où il brûle. Cette lampe est formée d'un bec à éventail, entouré d'un tube en laiton de 1^{cm} de diamètre et de 8^{cm} de hauteur, percé de plusieurs trous un peu au-dessous du bec, de manière que le gaz sortant en divergeant, frappe obliquement les parois du tube, et se mêle à l'air appelé par les trous. La flamme est volumineuse et sans fumée ; on y distingue une partie brillante conique et creuse, de 5^{cm} de hauteur, de couleur vert bleuâtre, et une enveloppe plus haute, très diffuse et peu colorée. Un écran percé d'une fente de 4 à 5^{mm} de hauteur, placé devant la flamme, permet d'étudier le spectre formé par la lumière qui émane de ses divers points. Si l'on commence par le haut, on a un spectre continu correspondant à l'espace compris entre les raies C et H de Fraunhofer. Ce spectre doit être attribué à la poussière de charbon incandescent, les solides donnant des spectres sans raies (2038). Cependant on y remarque la raie brillante correspondant à la raie D du spectre solaire ; mais M. Swan la regarde comme produite par des traces de sel marin répandues dans l'air ou dans le gaz, car on augmente l'intensité de cette raie, en portant dans la flamme une lame de platine qu'on a mouillée avec de l'eau contenant $\frac{1}{50000}$ de son poids de ce sel. — Si la fente se trouve vis-à-vis du sommet du cône bleuâtre, on voit apparaître 4 nouvelles raies brillantes, qui deviennent plus nettes à mesure qu'on abaisse la fente, en même temps que les espaces intermédiaires deviennent plus obscurs. Tout au bas de la flamme, là où manque l'enveloppe extérieure, les raies sont nombreuses, nettes et très brillantes ; elles restent les mêmes, quelle que soit la matière du tube. On voit que c'est dans le spectre discontinu de la partie inférieure de la flamme qu'il faut chercher les caractères distinctifs des flammes des carbures d'hydrogène. Or, M. Swan a reconnu que les raies sont les mêmes et correspondent aux mêmes indices de réfraction, pour les flammes des combinaisons hydrocarbonées de la forme $C^m H^n$, ou, $C^m H^n O^p$. Les expériences ont été faites sur les flammes du gaz d'éclairage, gaz oléfiant, gaz des marais, la paraffine, essence de térébenthine, esprit de bois, alcool, éthers sulfurique et méthylique, glycérine, blanc de baleine, camphre, cire, suif, huile de naphte.

[1] *Trans. phil. d'Edimbourg*, t. XXI ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. LVII, p. 363.

2041. Application aux analyses chimiques. — Beaucoup de substances, particulièrement les sels des métaux alcalins et alcalino-terreux, introduites dans les flammes, font apparaître dans le spectre qu'elles forment des raies brillantes particulières. MM. Kirchhoff et Bunsen ont prouvé que la nature de la combinaison dans laquelle le métal est engagé, et la nature des flammes et leur température, n'apportent aucune modification dans les raies brillantes appartenant à chaque métal [1]. Les expériences ont été faites sur les flammes de soufre, sulfure de carbone, alcool, oxyde de carbone, hydrogène, gaz tonnant, la partie non éclairante du gaz d'éclairage. Les raies sont d'autant plus distinctes que la flamme est plus chaude et la combinaison d'un même métal plus volatile. Quand plusieurs métaux sont introduits dans une flamme, chacun d'eux produit les raies qui le caractérisent, comme s'il était seul.

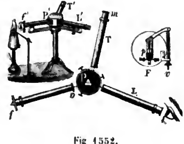


Fig 1552.

MM. Kirchhoff et Bunsen, en partant de ces lois, ont créé une nouvelle méthode d'analyse *qualitative*, permettant de constater rapidement la présence dans une substance, des moindres traces de corps que les méthodes ordinaires ne permettraient de reconnaître qu'après de minutieuses et longues opérations.

Les appareils destinés à appliquer cette méthode sont désignés sous le nom de *spectromètres*. La *fig*. 1552 représente celui qu'a construit M. Steinheil d'après les indications de MM. Kirchhoff et Bunsen. Le prisme est installé en P,P' dans un tambour noirci. En *f* est la fente devant laquelle on place la flamme d'une lampe de Bunsen, dans laquelle plonge un anneau en platine sur lequel on a déposé quelques parcelles de la substance à étudier. Un objectif *o* rend les rayons parallèles. Le faisceau réfracté est reçu dans une petite lunette à réticule L pouvant tourner autour de l'axe du prisme. Le tube T, également mobile, est destiné à relever la position des raies; en *m* est un micromètre horizontal éclairé par derrière, et dont l'image, réfléchie sur la face d'émergence du prisme, se projette sur le spectre, de manière qu'on voit facilement à quelles divisions appartiennent les raies.

La fente est représentée à part en F. On peut en modifier la largeur en agissant sur la vis *v*. La partie inférieure est couverte par un petit prisme *p* au moyen duquel on peut comparer les spectres de deux flammes; la seconde flamme est placée latéralement, et les rayons qui en partent éprouvent la réflexion totale dans le prisme *p*, et forment, en traversant le prisme P, un spectre qui se trouve immédiatement au-dessous de celui que forment les rayons qui passent directement par la partie libre de la fente.

[1] *Ann. de Pogg.*, t. CX, 161; et *Ann. de ch. et de phys.*, 3e série, t. LXII, p. 452.

M. Duboscq, par une disposition heureuse des pièces de l'appareil, l'a rendu d'un usage très commode. La fente, armée de son petit prisme *p*, est en *f* (*fig.* 1553). Les rayons qui en partent sont rejetés verticalement par la réflexion totale dans un prisme *q*, sont amenés au parallélisme par la lentille O et pénètrent dans le prisme P dont l'angle est de 30° et qui est mobile sur lui-même. Ces rayons rencontrent normalement en *n* la face inférieure qui est argentée, se réfléchissent, et reviennent sur eux-mêmes après avoir éprouvé la même dispersion que s'ils eussent traversé un prisme ayant un angle de 60°. Le spectre est observé au moyen d'un oculaire *o* à réticule *r*, qui, avec la lentille O, forme une lunette grossissant environ 4 fois.

Le micromètre qui sert à relever les positions des raies est placé en *m*; il est éclairé par une lumière particulière, et son image, réfléchie sur une glace sans tain *g* inclinée à 45°, se projette sur le spectre.

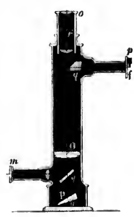


Fig. 1553.

MM. Kirchhoff et Bunsen ont d'abord appliqué la nouvelle méthode aux métaux alcalins et alcalino-terreux; ils ont observé et dessiné le système de raies caractéristiques de ces métaux; les résultats étaient obtenus au moyen d'une flamme intense, et en employant une fente assez étroite pour laisser distinguer les principales raies du spectre solaire; sous d'autres conditions, l'aspect des raies serait différent. Les raies se désignent par des lettres grecques placées à la suite du signe chimique du métal considéré; ainsi $Ca\beta$ indique une des raies caractéristiques du calcium *Ca*.

Voici quelques-uns des résultats déjà obtenus : le *sodium* est caractérisé par une raie jaune, brillante coïncidant exactement avec la raie D du spectre solaire. Ce moyen de déceler la présence du sodium est tellement sensible, qu'il suffit de faire détoner 3 milligrammes de chlorate de soude dans une chambre de 60 mètres cubes, pour que cette raie apparaisse, et cependant il n'y a pas plus de $\frac{1}{10\,000\,000}$ de milligrammes de sel dans les 50 centimètres cubes d'air qui traversent la lampe de Bunsen pendant 1 seconde. Comme la surface du globe est recouverte en grande partie par l'eau salée, on conçoit que l'air contient presque toujours quelques parcelles de sel marin; aussi voit-on très souvent apparaître la raie caractéristique du sodium. Il suffit d'épousseter un livre à côté de l'appareil, pour qu'elle apparaisse; un fil de platine qu'on a fait rougir et qui, plongé dans la flamme ne produit pas cette raie, la fait apparaître, s'il a séjourné quelques heures dans l'air. — Les raies caractéristiques du lithium et du strontium prouvent que ces métaux sont universellement répandus dans la nature en petites proportions, comme le potassium et le sodium. Enfin, cette méthode a conduit MM. Kirchhoff et Bunsen à la découverte de deux nouveaux

métaux, le *cœsium* et le *rubidium*, dont toutes les propriétés chimiques ressemblent beaucoup à celles du potassium.

2042. Action des vapeurs métalliques sur les rayons lumineux. — On a remarqué que les raies brillantes caractéristiques de plusieurs métaux coïncident exactement avec certaines raies noires du spectre solaire; nous avons cité le fait, prouvé par M. Miller, de la coïncidence de la raie jaune, du sodium avec la raie D de Fraunhofer; ces raies sont doubles, l'une et l'autre, quand on les observe dans de bonnes conditions. M. Kirchhoff a trouvé l'explication de cette coïncidence en partant du principe suivant auquel il a été conduit par la théorie et qu'il a confirmé par l'expérience[1]: les *vapeurs métalliques*, qui absorbent certains rayons colorés, comme le font les gaz proprement dits (2037), *absorbent précisément les rayons qu'elles émettent en grande quantité, quand elles sont incandescentes*, c'est-à-dire ceux qui forment les raies brillantes de leur spectre. Si donc on forme le spectre à raies brillantes d'une flamme, et si l'on fait passer à travers cette flamme des rayons solaires dont le spectre soit plus brillant que celui de la flamme, on verra des raies sombres aux endroits où étaient les raies brillantes; les rayons solaires de même réfrangibilité que les rayons les plus intenses de la flamme était absorbés par celle-ci. Par exemple, la lumière Drummond donne aux premiers moments la raie du sodium; on en marque la place, et quand celle-ci a disparu, on interpose une flamme d'alcool salé; aussitôt on voit apparaître une raie noire à l'endroit du spectre où se trouvait la raie brillante. Le spectre d'un fil de platine incandescent est continu; mais si l'on place une flamme devant ce fil, on voit apparaître des raies noires à la place des raies brillantes que donnerait la flamme seule. Le spectre ainsi formé se nomme le spectre *renversé* ou *inverse* de la flamme.

Ce principe sert à expliquer la coïncidence des raies caractéristiques des métaux avec les raies noires du spectre solaire, et conduit à une explication originale de celles-ci. Le soleil est composé d'un noyau solide incandescent enveloppé d'une couche gazeuse lumineuse (II, 1092). Le noyau solide donnerait un spectre continu; mais comme les rayons qui en émanent traversent la photosphère, le spectre présente des raies sombres, et n'est autre chose que le spectre *renversé* de la photosphère, dans lequel la présence des raies caractéristiques du sodium, du potassium, du magnésium, du fer, du nickel, du chrome, prouve l'existence de ces métaux dans la photosphère. Le lithium, l'aluminium, le zinc, le cuivre, etc., ne paraissent pas y exister, car aucune raie du spectre solaire ne correspond aux raies caractéristiques de ces métaux. On voit que ces considérations conduisent à ce résultat digne d'admiration, qu'on peut faire l'analyse chimique qualitative de l'atmosphère solaire. En étudiant la lumière des étoiles au même point de vue, MM. Kirchhoff et Bunsen ont trouvé que l'atmosphère de l'étoile *Pollux* contient du sodium, tandis

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVIII, p. 254; et t. LXII, p. 160.

que celle de *Sirius* ne semble pas en contenir, car son spectre ne contient pas la raie D.

2043. RAIES BRILLANTES DE LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE. — La lumière électrique donne, comme les flammes, des raies *brillantes*. C'est ce que Fraunhofer a constaté, au moyen d'un trait de lumière bleuâtre obtenu en laissant écouler dans le sol l'électricité d'une machine le long d'un fil trés fin placé entre deux boules métalliques. Une de ces raies, situées dans le vert, tranchait surtout par son éclat, sur le spectre, qui était peu brillant. M. Wheatstone a fait de nombreuses expériences sur ce sujet, au moyen de la lumière électrique de la pile, de l'étincelle ordinaire, et de l'étincelle d'induction. Ces trois sources lui ont donné les mêmes résultats. Il a reconnu que les raies brillantes dépendent de la nature des électrodes; quand ils sont formés d'un alliage, on obtient deux systèmes de raies produits par chacun des métaux; il en est de même

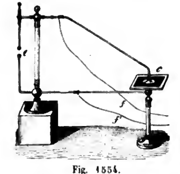


Fig. 1554.

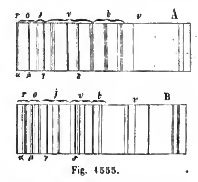


Fig. 1555.

quand les deux électrodes sont formés de métaux différents. Ces faits confirment la présence dans la lumière électrique des particules arrachées aux électrodes (III,1532). — MM. Kirchhoff et Bunsen ont reconnu au moyen de l'étincelle de la bobine de Ruhmkorff, que les raies sont les mêmes, pour chaque métal, que celles qui se produisent quand on introduit un sel de ce métal dans une flamme. On a donc là un moyen de faire l'analyse qualitative des alliages, sans les dissoudre et en n'en détachant que des parcelles imperceptibles.

Les expériences les plus détaillées sur les raies du spectre électrique ont été faites par Masson, dans son grand travail sur la photométrie électrique [1]. Il produisait l'étincelle au moyen d'un condensateur *c* (*fig.* 1554), dont il pouvait changer à volonté la surface; l'armature supérieure communiquait par le fil *f* avec une machine électrique positive et avec l'une des boules isolées *e*; l'armature et la boule inférieure communiquaient avec le sol par le fil *f'*. Au devant des boules *e*, était placé un goniomètre de Babinet (1915), au centre duquel était placé verticalement un prisme en flint de Guinand, ou en sulfure

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXI, p. 296.

de carbone, et dont le collimateur fixe était muni d'un diaphragme à fente verticale étroite, par laquelle passait la lumière de l'étincelle jaillissant en *e*. Les boules *e* pouvaient être renfermées dans des vases de forme variée, dans lesquels on pouvait faire le vide ou introduire des gaz ou des liquides. Voici les principaux résultats trouvés par Masson :

1° Le spectre électrique, qui présente toutes les couleurs du spectre solaire, est sillonné de raies brillantes, qui semblent blanches quand elles sont trés éclatantes, mais apparaissant avec la couleur qui régne dans la partie du spectre qu'elles occupent, quand la lumière incidente est moins vive.

2° La position de ces raies est indépendante de l'intensité de la décharge. M. Despretz avait déjà constaté ce résultat sur l'arc voltaïque en employant 100 couples, puis 600 arrangés en série, ou par groupes de 10.

3° Le nombre et l'aspect des raies brillantes dépendent de la substance des électrodes ; *mais, quelle que soit cette substance, il y a certaines raies constantes dans un même milieu* ; elles sont désignées par les lettres α, β, γ, δ dans la figure 1555, qui représente les systèmes de raies formées dans l'air par des électrodes en *charbon* A, et en *cadmium* B, dessinées à la chambre claire. Des expériences ont été faites aussi sur des électrodes en *antimoine*, *bismuth*, *plomb*, *étain*, *fer*, *cuivre*.

4° Dans le vide, les raies s'affaiblissent, ainsi que les couleurs, sans changer de place ; on ne peut plus les distinguer avec la lunette, il faut les observer à l'œil nu.

5° Ces résultats restent les mêmes, sauf l'intensité, quel que soit le moyen par lequel est engendrée la lumière électrique, et les raies brillantes peuvent servir avec avantage pour la mesure des indices.

6° Dans les liquides, la lumière de l'arc voltaïque produit entre deux charbons, ne donne pas de raies ; ce qui semble provenir de l'absence de particules transportées d'un pôle à l'autre. La longueur de l'étincelle n'était, dans les expériences de Masson, que de 3^{mm} environ, excepté dans l'essence de térébenthine, où elle atteignait une longueur de 10^{mm} ; il pourrait se faire qu'avec des décharges plus intenses, il y eût transport de particules et production de raies. Ce qui confirme cette manière de voir, c'est que, Masson ayant employé dans l'alcool, des électrodes en laiton, le métal fondit, le liquide se remplit d'une matière noire, probablement de l'oxyde trés divisé, et le spectre présenta aussitôt de belles raies brillantes.

Influence du milieu. — Il résulte des expériences de Masson qu'il existe dans le spectre de la lumière électrique des raies brillantes qui restent les mêmes, quelle que soit la substance des électrodes, et d'autres qui dépendent de cette substance. Celles-ci s'observent commodément en formant l'arc voltaïque entre deux charbons verticaux dont l'inférieur, qui est positif, présente une cavité dans laquelle on met le métal à étudier. — M. Angstrom ayant expérimenté dans divers gaz, a découvert que les raies indépendantes de la nature des électrodes, dépendent du milieu dans lequel jaillit la lumière électrique. M. Van

der Willingen a confirmé cette loi par de nombreuses expériences [1]. Il produisait la lumière au moyen d'une bouteille de Leyde chargée continuellement par une bobine de Rumhkorff, et donnant spontanément des décharges très rapprochées. Les électrodes étaient des fils métalliques de 1^{mm} environ de diamètre pénétrant par des boîtes à cuir dans un récipient à robinet. Le prisme, équilatéral en flint, était installé sur un goniomètre de Babinet, au moyen duquel on relevait la position des raies à 1′ près. Pour le chlore, l'appareil était tout en verre.

Quand les extrémités des fils métalliques sont très rapprochées, on ne voit bien que les raies brillantes caractéristiques du métal, celles qui sont dues à la présence du gaz disparaissant presque entièrement. Si l'on éloigne peu à peu les fils, les dernières raies deviennent de plus en plus brillantes, et les autres s'affaiblissent graduellement. Quand les électrodes sont en platine, fer, coke, on ne voit, dans l'air, que les raies propres à ce gaz, et tout au plus une ou deux raies des électrodes.

Dans les divers gaz les raies sont différentes et différemment espacées. Cependant, on remarque dans la plupart des spectres, quelques-unes des raies les plus brillantes qui se produisent dans l'air; ce qui semble tenir à la présence de quelques traces de ce gaz, car ces raies communes tendent à disparaître à mesure que les gaz sont plus purs, et se dessinent plus nettement quand on introduit un peu d'air. Il semble aussi résulter de là que la pression du gaz n'a pas d'influence, pourvu que l'électricité passe toujours par étincelles. Le protoxyde et le bioxyde d'azote donnent les mêmes raies que l'air.

Quand les électrodes sont humides, le spectre est comme voilé par un brouillard, et l'on aperçoit, outre les raies propres au gaz, deux des raies caractéristiques de l'hydrogène, ce qui provient de la décomposition de l'eau.— Dans la plupart des expériences, on voit la raie D caractéristique du sodium ayant une déviation de 5° ; on l'attribue à la présence de sel marin.

Quand la pression dans le récipient est assez faible pour que l'électricité passe sous forme d'aigrette, le spectre n'est plus sillonné de traits brillants, mais il est traversé par des bandes alternativement sombres et lumineuses, à peu près équidistantes et se fondant les unes dans les autres. L'aspect du spectre est différent suivant qu'on observe l'auréole qui enveloppe le fil négatif, ou le point brillant qui se montre à l'extrémité du fil positif.

Vapeurs. — Pour expérimenter sur les vapeurs [2], M. Plucker a pris pour source de lumière des tubes de Geissler (III, 1777) dans lesquels il laissait des traces des divers gaz ou vapeurs. Le spectre peut être regardé comme formé par la lumière de particules gazeuses rendues incandescentes par le passage du courant. Pour l'oxygène, le chlore, le bichlorure d'étain, la vapeur d'iode, les électrodes étaient en aluminium. Parmi les résultats observés nous citerons

[1] *Ann. de Pogg.* t. CVI, 610, et CVII, 473 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e s. t. LVII,, 367.
[2] *Ann. de Pogg.* t. CVII, 638 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. LVII, 497.

les suivants : l'hydrogéne et la vapeur d'eau donnent des spectres identiques, la vapeur étant bientôt décomposée. Avec l'azote, on observe 17 raies *noires* entre le rouge et le milieu du jaune, puis 11 groupes de raies brillantes. — Du sodium ayant été logé dans un renflement latéral de l'appareil contenant des traces d'acide carbonique, l'humidité a été décomposée, il s'est formé de la potasse qui a absorbé l'acide carbonique, et l'on a obtenu le spectre de l'hydrogéne ; mais dés que le sodium eut été chauffé, on vit apparaître la raie caractéristique de ce métal.

§ 2. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR ABSORPTION.

2044. Absorption de la lumière par les milieux diaphanes. — Nous avons vu (1871) qu'il n'y a pas de corps absolument opaques, et que tous laissent passer la lumière quand ils sont en lame suffisamment mince. De même, il n'y a pas de corps parfaitement transparents; tous absorbent une partie de la lumière qui les traverse; mais pour certains d'entre eux, comme le verre, l'eau, l'air, la proportion absorbée est tellement faible qu'elle n'est appréciable que lorsqu'ils sont en couche trés épaisse.

Certains milieux ont la propriété de donner à la lumiére blanche qui les traverse, une couleur d'autant plus prononcée qu'ils sont en couche plus épaisse ; tels sont les verres et les liquides dits *colorés*. On explique ce résultat en admettant que ces milieux absorbent, en différente proportion, les divers rayons qui composent la lumiére blanche. Ainsi, un verre rouge est celui qui absorbe beaucoup moins de rayons rouges que de rayons de toute autre couleur. Si les rayons émergents sont d'un rouge simple, comme cela a lieu avec une lame de verre de 1^{mm} d'épaisseur, colorée en rouge par le protoxyde de cuivre, c'est que la substance est *opaque* pour tous les rayons autres que les rayons rouges. Pour justifier cette théorie, on regarde un spectre à travers le verre rouge; on ne voit que la partie rouge, les rayons provenant des autres parties étant arrêtés, et ne pouvant pas parvenir à l'œil. Si le verre n'est pas d'une couleur simple, on aperçoit dans les parties du spectre dont les rayons sont le plus absorbés, des bandes d'autant plus sombres que la lame est plus épaisse. Par exemple avec un verre bleu azur, il ne reste, quand l'épaisseur est suffisante, que les rayons rouges et violets.

Si l'on fait passer les rayons qui ont traversé un verre rouge, à travers un second verre de même couleur, ce dernier n'absorbe qu'une trés faible proportion de la lumiére qu'il reçoit; c'est que les rayons qui ne peuvent traverser le verre rouge ont été arrêtés par la premiére lame, de telle sorte que la seconde ne reçoit que des rayons qui passent facilement. Si, au contraire, le second verre était d'une couleur verte ne pouvant laisser passer les rayons rouges, les deux verres superposés formeraient un écran opaque. Nous avons vu que

les rayons de chaleur donnent, en traversant des lames diathermanes, des résultats semblables, qui s'expliquent de la même manière (II,734).

Un milieu incolore est celui qui laisse passer dans les mêmes proportions toutes les espèces de rayons colorés; la lumière blanche qui traverse un semblable milieu, reste blanche. Il n'y a pas de milieu absolument incolore; l'eau et l'air eux-mêmes décomposent la lumière qui les traverse sous une très grande épaisseur, comme nous le verrons plus loin.

2045. Formule d'absorption. — La quantité de lumière de chaque couleur qui traverse une lame colorée dépend de son épaisseur et du *coefficient d'absorption* qui lui correspond. Pour calculer la couleur d'un faisceau de lumière blanche, qui a traversé une semblable lame, nous nous servirons de la formule $i = Ia^e$, dans laquelle e représente l'épaisseur de la lame, I l'intensité de la lumière incidente, et a la proportion qui traverse sans être absorbée, une tranche d'épaisseur égale à l'unité (1391). La quantité absorbée est alors $I(1-a^e)$.

Considérons un faisceau, composé de rayons des principales couleurs du spectre, l'intensité de ce faisceau sera $R+O+J+U+B+I+V$, les lettres représentant les intensités particulières de chaque espèce de rayon à son entrée. Appelons, r, o, j, u, b, i et v les fractions de chaque rayon qui traversent sans être absorbées une épaisseur égale à l'unité, l'intensité du faisceau sortant de la lame d'épaisseur e, sera

$$Rr^e + Oo^e + Jj^e + Uu^e + Bb^e + Ii^e + Vv^e. \qquad [1]$$

Les termes qui contiennent les fractions r, o, j..... les plus petites, décroîtront le plus rapidement quand e augmentera. Les couleurs qui correspondent aux autres termes domineront donc alors de plus en plus; la lumière émergente ne sera plus blanche, et l'on pourra calculer la teinte résultante, au moyen de règles que nous ferons connaître plus tard (2060). — Si les rayons d'une espèce, par exemple les rayons rouges sont moins absorbés que tous les autres, on pourra toujours, en augmentant suffisamment l'épaisseur, obtenir les rayons émergents rouges sensiblement homogènes; car, en augmentant e, on peut toujours rendre, aussi grands que l'on veut, les rapports $Rr^e : Oo^e$, $Rr^e : Jj^e$, etc. — Quand les quantités r, o, j.... diffèrent peu de l'unité, et que l'épaisseur est faible, la somme [1] diffère peu de celle qui représente le faisceau incident; ce qui veut dire que la lumière n'est pas sensiblement colorée.

2046. Représentation graphique des résultats. — Pour rendre plus facile l'interprétation de la formule précédente, M. W. Herschel emploie les constructions graphiques[1]. Distribuons sur une horizontale jv' (*fig.* 1556), les différentes couleurs du spectre, et représentons par des ordonnées élevées au

[1] *Traité de la lumière*, traduction française, t. I, p. 293.

milieu de chaque couleur, les intensités des divers rayons colorés quand ils ont traversé un milieu d'épaisseur donnée. Supposons aussi que tous les rayons colorés entrent avec la même intensité représentée par 1, et prenons *ja* égal à l'unité ; la droite *ac* sera *l'emblème* d'un milieu incolore, c'est-à-dire qui laisserait passer également sans absorption tous les rayons colorés. S'il s'agit d'un milieu coloré, prenons sur les ordonnées des longueurs proportionnelles à r^e, o^e..... v^e. Nous obtiendrons une ligne, 1, qui sera la *courbe emblème* d'un milieu coloré d'épaisseur *e*. Pour une autre épaisseur, nous aurions une autre courbe, 2 ; et l'on reconnaîtra facilement ainsi, quelles sont les couleurs qui tendent à disparaître pour laisser prédominer les autres : par exemple, si la courbe a un maximum dans le vert (*fig.* 1558), les rayons verts passent plus facilement que tous les autres ; à mesure que l'épaisseur augmentera, la couleur verte dominera et s'épurera de plus en plus, de manière à devenir homogène.

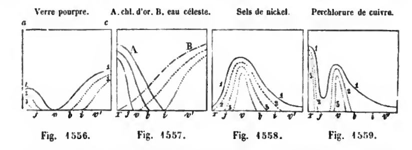


Fig. 1556. Fig. 1557. Fig. 1558. Fig. 1559.

C'est ce qui a lieu pour les verres colorés en vert, les dissolutions de sels de cuivre, de nickel, etc., qui absorbent fortement les extrémités du spectre ; le rouge plus que le violet, si leur teinte est bleuâtre, et le violet plus que le rouge, si elle est jaunâtre.

Pour juger de la forme de la courbe, on regarde un trait lumineux à travers un prisme et à travers la lame colorée. Partout où le spectre est assombri, la courbe s'abaisse, et d'autant plus que la teinte est plus sombre. Cette méthode ne donne que des à peu près, la diminution d'intensité dans une couleur, ne pouvant s'évaluer exactement, et de plus, les couleurs ne pouvant s'apprécier que difficilement, à cause des illusions qui proviennent d'effets de contraste, sur lesquels nous reviendrons.

2047. Polychroïsme. — Il résulte de la théorie précédente que certains milieux doivent paraître d'une couleur différente suivant l'épaisseur qu'on leur donne. C'est en effet ce qui a lieu, et ce phénomène est connu sous le nom de *polychroïsme*. Considérons d'abord un milieu, tel que la courbe emblème aille en diminuant du rouge au violet. Si le rouge domine, même dans les plus faibles épaisseurs, la couleur, toujours rouge, sera de plus en plus foncée et de plus en plus pure, à mesure que l'épaisseur augmentera ; c'est ce qui a lieu avec les verres rouges écarlates. Mais si le coefficient d'absorption des rayons orangés

et jaunes diffère peu de celui des rayons rouges (A, *fig.* 1557), la teinte sera jaune pour les faibles épaisseurs, et brunira, puis passera au rouge quand l'épaisseur augmentera. Tels sont : le vin de Porto, l'infusion de safran, le perchlorure de fer, le chlorure d'or, l'eau-de-vie vieille, etc. On vérifie cela très facilement, en donnant à la substance, la forme d'un prisme à angle aigu; la couleur n'est pas la même aux différentes distances de l'arête du prisme.

Il peut arriver que la courbe emblème ait deux maximum. M. W. Herschel propose de nommer *dichromatiques* les milieux qui sont dans ce cas, parce que, laissant passer particulièrement deux sortes de rayons, ils sont comme s'ils avaient deux couleurs : par exemple, les solutions de chlorure de chrome, de vert de vessie, de manganate de potasse, l'infusion de pétales de certaines fleurs rouges et les mélanges des liquides rouges et verts, ou rouges et bleus, ont un maximum dans le rouge et un autre dans le vert. Le plus souvent le maximum rouge l'emporte sur le vert, de sorte que la teinte devient livide et rougeâtre à mesure que l'épaisseur augmente (*fig.* 1559). Les verres pourpres et cramoisis, les solutions acides et alcalines de cobalt, etc., sont aussi dichromatiques; ces substances absorbent fortement les parties moyennes du spectre, les unes passant au violet quand l'épaisseur augmente, les autres passant au rouge.

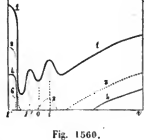


Fig. 1560.

Les milieux bleus sont le plus souvent *dichromatiques*; ils absorbent surtout les rayons rouges et jaunes les plus éclatants, et laissent passer les rayons violets avec une grande facilité (B, *fig.* 1557). Parmi ceux dont le pouvoir absorbant décroît le plus régulièrement depuis le rouge jusqu'au violet, il faut citer les dissolutions des sels de cuivre, par exemple l'eau céleste, que l'on obtient en saturant le sulfate de cuivre avec le carbonate d'ammoniaque. Un tube de verre d'une douzaine de centimètres de longueur, fermé par des glaces et rempli de ce liquide, donne une lumière violette bien homogène.

Parmi les milieux bleus, M. Herschel cite, comme un des plus curieux, le verre azur ou bleu de cobalt, qui prend une teinte rougeâtre de plus en plus prononcée, et devient tout à fait rouge quand on augmente son épaisseur. La courbe emblème de ce milieu présente plusieurs maximum (*fig.* 1560). La courbe 1 correspond à une épaisseur de 1 millimètre, les courbes 2, 4 et 6, à des épaisseurs double, quadruple et sextuple.

2048. Influence de la chaleur. — La chaleur rend généralement plus foncée la teinte des corps transparents, comme le remarquent souvent ceux qui fondent les minéraux au chalumeau, et la couleur reprend sa première nuance par le refroidissement; le dérangement des molécules par la dilatation augmente donc la faculté absorbante de ces milieux. Quelquefois la chaleur change

la couleur. Ainsi, M. Brewster a trouvé des minéraux transparents et des verres colorés qui passent du rouge au vert quand on les échauffe, et redeviennent rouges par le refroidissement.

L'influence de la chaleur se voit aussi dans les expériences suivantes de M. Faraday[1]. Une feuille d'or, n'ayant que $\frac{1}{1100}$ de millimètres d'épaisseur est rendue 10 à 20 fois plus mince par l'action d'une dissolution de cyanure de potassium, puis appliquée sur une lame de verre. Cette feuille laisse passer de la lumière verte; mais si on la chauffe fortement, elle devient incolore par transmission et semble disparaître. En même temps elle réfléchit moins de lumière, car de jaune d'or elle passe au brun pâle. Si on la comprime fortement pendant qu'elle est incolore par transmission, elle reprend sa couleur verte. — Si l'on volatilise un fil d'or par une décharge électrique, auprès d'une lame de verre ou de mica, l'or se dépose sur la lame en une couche jaune par réflexion. Mais par transmission, cette couche est rouge sombre au-dessous du fil, violette et quelquefois bleue ou verte tout à côté, et violette un peu plus loin. Si l'on chauffe au rouge sombre, la teinte rouge rubis se montre partout. Si l'on comprime fortement cet or pulvérulent entre deux plaques d'agate, il devient en certains points, vert par transmission. — Les feuilles d'argent du commerce ne laissent pas passer la lumière; mais, au rouge sombre, elles deviennent translucides et perdent en même temps leur pouvoir réflecteur.

2049. Cas de plusieurs milieux. — Si les rayons lumineux traversent successivement plusieurs milieux, chacun d'eux agit sur la lumière, et l'effet total se calcule au moyen des effets de chacun des milieux. Par exemple, si R est l'intensité des rayons rouges qui entrent dans le premier milieu; r, r', r''..., les coefficients de transmission qui correspondent à chacun des milieux, dont les épaisseurs sont e, e', e''..., l'intensité des rayons qui sortent du premier, et qui passent dans le suivant, sera, en négligeant les pertes par réflexion Rr^e; par conséquent $Rr^e \times r'^{e'}$ sera l'intensité des rayons sortant du second milieu, $Rr^e r'^{e'} \times r''^{e''}$ celle des rayons sortant du troisième, et ainsi de suite. On voit que l'ordre dans lequel les milieux se succèdent n'a aucune influence sur le résultat. On peut même mêler les substances, quand elles sont liquides et qu'elles n'ont pas d'action chimique les unes sur les autres, sans changer la couleur et l'intensité des rayons émergents.

2050. Hypothèse de M. Brewster sur la constitution du spectre. — Dans la théorie de Newton, on admet que le spectre est formé d'une infinité de rayons *simples*, et qu'à chaque couleur correspond une réfrangibilité particulière, de sorte que la couleur est intimement liée à la réfrangibilité. Nous avons vu avec quelle facilité cette théorie explique tous les phénomènes. M. Brewster, en étudiant la décomposition de la lumière par absorption, a rencontré certains faits qu'il considère comme incompatibles avec cette théorie,

[1] *Trans. phil.* pour 1857, p. 145; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e s., t. LIII, p. 60.

et il a adopté, sur la constitution du spectre, une nouvelle hypothèse qui a beaucoup occupé les physiciens ; voici comment il la formule :

1° La lumière blanche est composée de *trois* couleurs seulement : *rouge*, *jaune*, *bleu*, mélangées en certaines proportions.

2° Le spectre est formé de trois spectres superposés présentant ces trois couleurs dans toute son étendue, mais avec des intensités variant d'un point à l'autre, et présentant leur *maximum* en des points différemment placés. Si *rv* (*fig.* 1561) représente la longueur du spectre, ces intensités en chaque point seraient proportionnelles aux ordonnées de la courbe R, pour les rayons *rouges* ; de la courbe J pour les rayons *jaunes*, et de la courbe B pour les rayons *bleus* ; par exemple, en *a* le bleu domine et est mêlé de jaune et de rouge en quantités proportionnelles à *an* et à *ao*, et le mélange donne la couleur indigo qu'on observe en *a*.

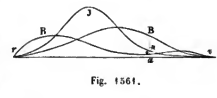


Fig. 1561.

3° Il y a des rayons de chacune de ces trois couleurs, présentant tous les degrés de réfrangibilité compris entre ceux des rayons extrêmes du spectre.

4° Toutes les couleurs du spectre sont *composées* ; et comme tous les rayons réunis en un même point ont la même réfrangibilité, elles ne peuvent être décomposées par une nouvelle réfraction.

La supposition que le spectre ne contient que trois couleurs est déjà ancienne. A peine la théorie de Newton était-elle connue en France, que le peintre Gauthier, observant qu'on peut obtenir toutes les couleurs en mélangeant en proportions convenables des matières rouges, jaunes et bleues, soutint que la lumière blanche n'était composée que de ces trois couleurs. En 1775, Mayer présenta une hypothèse semblable, dans un ouvrage intitulé *De affinitate colorum*. Wiensch, en 1792, et A. Prieur, en 1806, supposèrent aussi qu'il n'y avait que trois couleurs primitives ; seulement, ils adoptèrent le rouge, le vert et le violet, ce qui leur permettait d'expliquer plus facilement la présence de cette dernière couleur dans le spectre. — Enfin, M. Brewster soutint de nouveau l'opinion de trois couleurs primitives et chercha à l'appuyer d'un grand nombre d'expériences. Il est évident que ce système serait solidement établi, si l'on pouvait prouver l'existence de chacune des couleurs dans *toutes* les parties du spectre, et y montrer de la lumière blanche en enlevant une proportion convenable des couleurs qui sont en excès. C'est ce que M. Brewster a tenté de faire de différentes manières, entr'autres en cherchant à absorber, en tout ou en partie, au moyen de lames colorées, les rayons mêlés à ceux dont il faut prouver l'existence.

Ce qui prouve, suivant M. Brewster, qu'il y a de la lumière blanche dans le spectre, c'est que si on l'observe à travers une lame de verre bleu d'azur

suffisamment épaisse, on voit à la place du jaune, une bande d'un blanc verdâtre, quelquefois rougeâtre, suivant la nuance du verre. Le blanc est à peine teinté de vert ou de rouge, quand on regarde à travers une solution de sulfate de cuivre mêlée d'un peu d'encre rouge. Cette lumière blanche se décompose en passant à travers une feuille de gélatine; quand cette feuille est jaune ou verte, la bande blanche paraît jaune ou verte, par l'absorption des rayons bleus ou rouges. M. Brewster a vu, par des moyens analogues, du blanc dans le vert et dans l'orangé. Il conclut de là que les trois couleurs existent dans le jaune, le vert et l'orangé.

Pour prouver l'existence du *rouge* dans les autres parties du spectre, il remarque que le bleu et l'indigo, vus à travers certains liquides jaunes, comme l'huile d'olive, prennent une teinte violette; d'où il conclut la présence, dans ces deux couleurs, du rouge et de l'indigo.

Pour prouver l'existence du *jaune* dans le bleu, il montre qu'en regardant cette couleur à travers une lame de gélatine bleue, on voit une bande blanche; de plus, le bleu et l'indigo tournant au violet quand on les regarde à travers le verre bleu, il en conclut que les rayons absorbés ne peuvent être que des rayons jaunes. En regardant le spectre à travers une couche de baume du Pérou, de poix, de baume de soufre, ou de mica rouge, il voyait distinctement du jaune dans le rouge, près de la raie C. Il cite aussi à cet égard une expérience de Herschel, qui, ayant fait tomber de la lumière rouge sur du cuivre poli, trouva à la lumière réfléchie l'apparence de l'orangé, d'où M. Brewster conclut qu'il y a du jaune dans le rouge. S'il n'a pu voir le jaune dans les rayons violets, il l'attribue à la faiblesse de ces rayons et à la facilité avec laquelle ils sont absorbés par les milieux de toutes les couleurs.

Il n'y a plus qu'à montrer qu'il y a du *bleu* dans le jaune et dans le rouge; or, M. Brewster a distingué du vert dans le rouge vu à travers le baume du Pérou, la poix, le baume de soufre, ou le mica rouge.

2051. Discussion du système de M. Brewster. — Ce système n'a pas été généralement adopté. D'abord il se trouve en opposition formelle avec la théorie des ondulations; de même qu'il y a une infinité de sons correspondant à une infinité de longueurs d'ondulation de l'air, de même il doit y avoir une infinité de couleurs correspondant à une infinité de longueurs d'ondulations de l'éther, ce qui entraîne, comme nous le verrons, une infinité de réfrangibilités différentes. D'un autre côté, pour expliquer les raies noires du spectre solaire, il faudrait admettre que certains rayons manquent dans les *trois* spectres colorés, précisément aux mêmes points. Mais la grande autorité du nom de M. Brewster exigeait que l'on opposât à son système autre chose que des difficultés théoriques; aussi, ce sujet a-t-il été l'objet des travaux de plusieurs physiciens.

On a remarqué d'abord que M. Brewster, pour prouver l'existence des couleurs primitives dans certaines parties du spectre, admet que, là où il y a une couleur susceptible d'être produite par le mélange de deux autres, ce mélange existe réellement. Or, c'est supposer ce qu'il faut démontrer, puisqu'il

s'agit de prouver qu'il n'y a de couleur simple en aucun point du spectre. En outre, l'apparition, en divers points du spectre observé à travers certains milieux, de couleurs autres que celles qui s'y montrent à l'œil nu, a été contestée, et il est évident que toute la question est là.

M. Airy a surtout recherché avec attention les causes qui peuvent produire des illusions dans les expériences [1]. Il remarque d'abord que la préférence donnée aux trois couleurs *rouge, jaune, bleu* n'est aucunement justifiée, d'autres conleurs pouvant, avec des conrbes d'intensité convenables, donner le même spectre. Il a ensuite cherché si la couleur qui se montre en un point du spectre peut réellement être modifiée par l'interposition de lames colorées. La première condition, pour obtenir des résultats concluants, est d'éviter toute lumière étrangère qui, décomposée par la lame, ferait apparaître la couleur qui lui est propre. La seconde est de comparer le spectre regardé à travers la lame, au spectre vu directement; car on ne peut bien juger de la différence ou de l'identité de deux couleurs qu'en les voyant simultanément. M. Airy forme, au moyen des rayons solaires traversant une fente, un prisme et une lentille cylindrique, un spectre assez pur pour y distinguer les principales raies. La lame colorée étant placée sur la moitié de la longueur de la fente, ce spectre se trouve partagé en deux, de manière que les raies se continuent sur les deux moitiés. Ayant opéré avec une foule de substances solides et liquides, il lui fut impossible de soupçonner même la plus petite différence de couleur dans les points correpondants des deux spectres; l'absorption ne produisait que des diminutions d'intensité, M. Airy remarque aussi que, si l'on ne compare pas le spectre vu à travers un absorbant, au spectre direct, on peut croire à des couleurs différentes de celles qui existent, la naturo de l'impression produite par une couleur dépendant de son intensité, de même qu'un son grave trés intense semble beaucoup plus grave qu'il ne l'est réellement, comme cela a lieu pour le son des grosses clochos, dont on est tout étonné de pouvoir prendre l'unisson avec la voix.

M. F. Bernard a examiné spécialement cette influence de l'intensité [2]; il remarque qu'un mince faisceau de rayons solaires, reçu dans l'œil après avoir traversé un prisme donnant un spectre bien pur, paraît d'un blanc éblouissant entre les raies A et F ; l'extrémité rouge semble mêlée de jaune ; la teinte est légérement bleuâtre entre les raies E et F, et le reste du spectre présente une espèce de violet sale trés clair. Si l'on diminue l'intensité de la lumiére incidente, le jaune et l'orangé apparaissent ; les autres couleurs sont plus franches, et le vert se manifeste. — Si l'on reçoit le spectre bien pur sur un écran qu'on éloigne beaucoup pour diminuer l'intensité, la partie la plus lumineuse paraît d'un blanc verdâtre, l'espace bleu prend une teinte violette, et toutes les couleurs tendent à se confondre en se rapprochant du gris. —

[1] *Philosophical magazine* (1847), février, nº 199, et mars, nº 200.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXV, p. 385.

M. F. Bernard a encore fait l'expérience qui suit : un faisceau de rayons solaires, rendus divergents par une lentille, traverse un tube de 2 centimètres de longueur rempli d'une solution concentrée de sulfate de cuivre ammoniacal. Ce tube projette une image bleue brillante sur un écran placé à quelques centimètres de son extrémité ; mais si l'on éloigne l'écran, l'image s'affaiblit et semble passer à l'indigo, puis, à 5 ou 6 mètres, elle paraît d'un violet très rougeâtre; cependant la dissolution, sous l'épaisseur qu'on lui donne ici, absorbe tous les rayons du spectre, sauf les bleus et les violets. Le résultat est le même quand on affaiblit l'image projetée sur l'écran laissé à la même place, au moyen de lames de verre incolores placées avant la dissolution, et sur lesquelles il se réfléchit une portion notable de la lumière incidente.

M. Melloni a montré, de son côté, l'influence qu'exerce sur les résultats observés l'épaisseur du faisceau incident qui forme le spectre [1]. Ayant regardé une fente lumineuse à travers un prisme et une lame de verre bleu cobalt, il vit à la place de l'orangé, une bande obscure sur laquelle empiétaient le jaune et le rouge. Mais, ayant noirci la face d'incidence du prisme, en ne laissant à découvert qu'un espace étroit parallèle aux arêtes, la place de l'orangé ne parut plus envahie par d'autres couleurs. Ces couleurs provenaient donc des spectres formés par les rayons tombant près des bords de la face d'incidence, et ne coïncidant pas avec ceux que formaient les rayons entrant par le milieu de cette face.

M. Helmholtz a mis en évidence, par plusieurs expériences, l'influence sur les couleurs du spectre observé à travers une lame colorée, de la lumière diffusée par cette lame, par le prisme et par la lentille destinée à épurer le spectre [2]. Or, M. Brewster a souvent employé des lames d'une transparence imparfaite, par exemple, des lames de gélatine. Pour éliminer toute lumière diffuse, M. Helmholtz fait tomber un spectre bien pur sur un écran percé d'une fente par laquelle passe un mince pinceau coloré. Ce pinceau tombe sur un second prisme suivi d'une lentille, qui donnent une image colorée de la fente et un léger spectre provenant de la lumière diffuse qui a traversé cette fente. Ce spectre n'altère pas sensiblement la pureté de l'image focale, sur laquelle il ne projette qu'une très faible partie de la lumière qui le forme. En examinant ainsi successivement les différentes couleurs épurées du spectre, à travers divers milieux, on n'y peut jamais distinguer de teinte autre que celle de la couleur observée. — M. Helmholtz montre aussi que certains effets de contraste peuvent induire en erreur quand on n'isole pas chaque couleur comme il le fait. Par exemple, quand on regarde le spectre à travers un liquide brun, on voit le rouge bordé d'une teinte verte qui occupe la place de l'orangé et du jaune, tandis que cette teinte ne se montre aucunement quand on regarde le jaune ou l'orangé isolés comme il vient d'être dit.

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. V, p. 948.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVII, p. 70.

On doit conclure de ces expériences qu'il n'est pas plus possible de décomposer les couleurs du spectre par absorption que par réfraction ; que ces couleurs sont simples, et qu'à chaque couleur correspond un degré de réfrangibilité particulier. La théorie de Newton reste donc intacte.

Nous allons voir, en outre, que les peintres qui cherchent à composer toutes les nuances au moyen de trois couleurs seulement, n'obtiennent que des résultats approximatifs ; car en opérant directement, au moyen des rayons colorés, on ne peut former toutes les couleurs par la combinaison de trois sortes de rayons seulement (1914). L'hypothèse de trois couleurs primitives manque donc aussi de base.

§ 3. — DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE PAR RÉFLEXION, ET THÉORIE DES COULEURS.

2052. Des couleurs simples et des couleurs composées. — Le mot *couleur* peut s'entendre de trois manières différentes. Il exprime 1° les qualités particulières qui distinguent les rayons lumineux ; 2° la propriété des corps de nous lancer telle ou telle espèce de rayons, soit par réflexion diffuse, soit directement s'ils sont lumineux par eux-mêmes ; 3° la nature de la sensation particulière produite dans l'œil par les rayons lumineux. Cette dernière manière de considérer les couleurs ne nous occupera que plus tard, quand nous étudierons la vision.

Newton divise les couleurs en *simples* ou *élémentaires*, et en *composées*. Les premières sont celles qui se voient dans un spectre bien pur. Elles appartiennent aux rayons simples, directs ou réfléchis par une surface blanche.

M. Chevreul divise les couleurs simples en couleurs *lumineuses*, qui sont le *rouge*, l'*orangé*, le *jaune*, le *vert* ; et en couleurs *sombres*, qui sont le *bleu*, l'*indigo* et le *violet* ; celles-ci ont beaucoup moins d'éclat que les premières.

Les *couleurs composées* sont formées par le mélange des couleurs simples. Elles peuvent être semblables à celles du spectre, mais rarement identiques, quant à l'impression produite sur l'organe de la vue. Ainsi, on peut, par le mélange de certains rayons colorés, obtenir du rouge, de l'orangé... analogues aux mêmes couleurs du spectre, mais qui en diffèrent essentiellement, en ce que, formées de rayons inégalement réfrangibles, elles sont décomposables par la réfraction.

2053. Couleurs complémentaires. — Newton désigne ainsi deux couleurs dont le mélange produit du blanc. Si l'on dévie une partie des rayons sortant du prisme P (*fig.* 1544), au moyen d'un prisme placé en *p*, les couleurs obtenues en F et F′ sont complémentaires, puisque leur réunion formerait du blanc. En avançant plus ou moins le prisme *p*, on fera varier les deux couleurs complémentaires. On peut encore prendre deux disques à secteurs colorés des nuances du spectre (2030), couvrir, sur l'un d'eux, certains secteurs avec du

papier noir, et laisser ces mêmes secteurs seuls à découvert sur l'autre ; ces disques présenteront des couleurs complémentaires pendant la rotation. On trouve, ainsi, que les couleurs *rouge* et *vert* ; *orangé* et *bleu* ; *jaune* et *violet*, sont complémentaires l'une de l'autre.

Toute couleur simple ou composée a sa couleur complémentaire, et, de plus, chaque couleur a une infinité de couleurs complémentaires, puisque en ajoutant du blanc en proportion quelconque à l'une ou à l'autre des deux couleurs, elles ne cessent pas de former du blanc par leur mélange. On peut obtenir de la lumière blanche au moyen de verres de couleurs complémentaires non simples ; par exemple, en superposant un verre rouge et un verre bleu. M. Maumenée forme un liquide incolore en mélangeant une dissolution rose d'un sel de nickel avec une dissolution bleue d'un sel de cobalt. Ces liquides mélangés agissent donc comme s'ils étaient simplement superposés (2049).

2054. Expériences de M. Helmholtz. — Ces expériences ont été faites directement sur les rayons du spectre solaire. Après avoir obtenu, au moyen d'un prisme et d'une lentille achromatique, un spectre bien pur dans lequel on distingue les raies de Fraunhofer (2034), on reçoit ce spectre sur un écran muni de deux fentes étroites parallèles aux arêtes du prisme et pouvant être rapprochées l'une de l'autre. Les fentes laissent passer deux pinceaux colorés homogènes, que l'on reçoit sur une lentille qui les rapproche et les réunit sur un écran blanc placé à une distance convenable. M. Helmholtz a reconnu, par ce moyen, qu'il existe une infinité de groupes binaires de couleurs qui, combinées en *proportions convenables*, forment du blanc parfait. A l'exception du vert pur, toute couleur simple du spectre est complémentaire d'une autre couleur simple.

Dans ces expériences, on faisait varier le rapport entre les intensités des deux couleurs mélangées, en modifiant les largeurs des fentes. Ces intensités relatives étaient mesurées par le moyen suivant : les largeurs des fentes étant évaluées par des procédés micrométriques, on rétrécissait la plus large jusqu'à ce que le faisceau auquel elle donnait passage fût de même intensité que l'autre ; ce que l'on jugeait avec assez d'exactitude par la méthode de Rumfort (1885), malgré la différence de couleur des ombres. La diminution qu'il avait fallu faire subir à la fente la plus large permettait de calculer le rapport qui existait entre les intensités des faisceaux au moment où ils produisaient de la lumière blanche. Un fait remarquable, c'est que ce rapport dépend de l'intensité absolue de la lumière incidente. C'est ce qui ressort des résultats suivants :

Groupes de couleurs complémentaires.		Rapport des intensités de la deuxième couleur à la première	
		Lumière vive.	Lumière faible.
Violet	— jaune verdâtre........	10	5
Indigo	— jaune................	4	3
Bleu	— orangé..............	1	1
Bleu verdâtre	— rouge....	0,44	0,44

Parmi ces résultats, il en est un auquel on ne se serait pas attendu ; c'est la production du blanc au moyen des raynns *bleus* et *jaunes*, tandis que le mélange de substances de ces deux couleurs donne toujours du vert. M. Helmholtz a contrôlé ce résultat par le moyen suivant : il pose sur une table noire deux disques colorés, l'un par le jaune de chrome ou la gomme gutte, l'autre par le bleu d'azur de cobalt ; entre les deux, il fixe verticalement une glace sans tain, et place l'œil de manière que l'image de l'un des disques vu par réflexion se superpose à l'autre disque vu à travers la glace. Les deux couleurs se trouvent ainsi mélangées dans l'œil, et l'on voit un disque blanc. Avec l'outremer artificiel, il y a une légère teinte rougeâtre, et avec le bleu de Prusse une teinte verdâtre. Si le mélange des substances bleues et jaunes donne du vert, c'est que les parcelles translucides sont traversées par les rayons lumineux, qui, se réfléchissant à une certaine profondeur, viennent mêler aux rayons réfléchis à la surface, des couleurs provenant d'une décomposition par absorption. — La méthode qui précède peut servir à trouver l'effet du mélange de deux couleurs quelconques. En éloignant plus ou moins les disques, de la glace, on modifie l'intensité relative des rayons qu'ils envoient à l'œil.

2055. DE LA COULEUR DES CORPS. — Des corps différents éclairés par une même source de lumière peuvent présenter des couleurs différentes. C'est à Newton que l'on doit la première explication rationnelle de ce phénomène, sur lequel on n'a eu, longtemps, que des idées vagues et confuses. Plutarque nous a conservé quelques-unes des opinions des philosophes de l'antiquité sur ce sujet. Empédocle, Platon, les pythagoriciens regardaient la couleur comme appartenant en propre aux corps. Epicure regarde au contraire la couleur comme appartenant à la lumière ; les corps la réfléchissent, en en modifiant les propriétés suivant l'arrangement de leurs parties superficielles. Parmi les péripatéticiens, les uns regardèrent la couleur comme appartenant aux corps ; d'autres la faisaient naître d'un mélange d'ombre et de lumière ; d'autres enfin la regardaient comme une émanation, variable suivant la nature du corps. Boyle et Vossius revinrent à l'opinion que la couleur appartient aux rayons lumineux, et le premier fit quelques expériences pour l'appuyer. Descartes adopta cette idée, mais il supposa que le plus ou moins d'intensité des rayons réfléchis déterminait la sensation des différentes couleurs. Le P. de Chales, qui a fait, trente ans avant Newton, beaucoup d'expériences sur le spectre, est arrivé, en combattant l'opinion de Descartes, à formuler quelques idées qui ne sont pas sans analogie avec celles que Newton a étayées d'un si grand nombre d'expériences.

2056. De la décomposition de la lumière par réflexion. — Pour expliquer les couleurs des corps, Newton admet qu'ils *décomposent* à leur surface la lumière incidente, en absorbant une partie des rayons qui la composent, et réfléchissant l'autre *diffusément* (1896) ; de manière que celle-ci est colorée parce qu'elle n'est pas composée de rayons simples réunis dans les mêmes proportions que dans la lumière incidente. Les corps *noirs* sont ceux qui

absorbent toute la lumière incidente; les corps *blancs*, ceux qui réfléchissent en mêmes proportions tous les rayons simples qui la composent. Ces deux sortes de corps agissent de la même manière sur toutes les espèces de rayons. Entre ces deux extrêmes se trouvent une infinité de corps qui réfléchissent les divers rayons colorés en proportions très différentes. Ainsi, un corps rouge est celui qui réfléchit principalement les rayons rouges; un corps jaune réfléchit en plus grande proportion les rayons jaunes, etc. Il n'est pas plus difficile de concevoir cette différence d'aptitude à absorber et à réfléchir les divers rayons colorés, que de concevoir l'inégale absorption de ces rayons par des corps diaphanes. La couleur n'appartient donc pas à la matière, qui ne fait que *décomposer* la lumière incidente, en absorbant certains rayons et renvoyant les autres. Du reste, quand le corps est opaque, la décomposition a lieu dans les couches superficielles d'épaisseur insensible qui le terminent, et le résultat est indépendant des couches qui sont au-dessous. Cette théorie est basée sur un grand nombre d'expériences, dues, pour la plupart, à Newton.

1° Si l'on fait tomber sur une surface *blanche* les rayons dispersés par un prisme, chaque point réfléchit la lumière qu'il reçoit, et paraît de la couleur de cette lumière. Si la surface est *rouge*, elle est très éclatante dans la partie rouge du spectre, mais les autres couleurs sont faibles, la surface rouge réfléchissant abondamment les rayons rouges, mais en faible proportion les autres rayons. Si le corps est susceptible d'absorber totalement certains rayons, on voit des parties noires dans le spectre; et, si l'on éclaire le corps avec cette espèce de rayons seulement, il paraît noir.

2° Une surface colorée éclairée par un faisceau de même couleur, présente le même aspect qu'une surface blanche éclairée par ce même faisceau; mais si la lumière incidente est d'une autre couleur que la surface, celle-ci présente généralement une nuance différente de celle de la surface blanche; la première réfléchissant en proportions différentes les divers rayons qui composent le faisceau incident, tandis que la surface blanche les réfléchit tous également. On fait cette expérience au foyer de la lentille de la *fig.* 1544, en interceptant certains rayons du faisceau dispersé. Si l'on intercepte précisément les rayons que la surface colorée réfléchit le plus abondamment, elle pourra présenter la même couleur qu'une surface blanche; c'est ainsi que l'or prend la même couleur que l'argent, quand on intercepte les rayons jaunes.

3° Si l'on éclaire un même corps coloré, au moyen de différentes sources lumineuses, il peut présenter successivement des couleurs différentes; les spectres formés par ces diverses sources n'étant pas composés des mêmes couleurs dans les mêmes proportions. C'est ainsi que des corps verts à la lumière du jour, paraissent bleus à celle d'une lampe; les rayons jaunes étant moins nombreux dans le spectre de la flamme, que dans le spectre solaire. Certains verts d'eau paraissent fauves à la lampe. Un corps qui paraît blanc un peu avant le lever du soleil est bleuâtre au grand jour. S'il est blanc à la lumière d'une lampe, il est jaune ou brun aux rayons solaires. Les teints bruns

paraissent beaucoup plus blancs à la lumière des bougies. Au clair de lune, la plupart des objets prennent des nuances tout autres que pendant le jour. M. Talbot a reconnu que la flamme de l'alcool salé est sensiblement *monochromatique*; elle n'émet guère que des rayons jaunes. Si l'on éclaire avec cette lampe une série de bandes présentant les sept principales couleurs du spectre, les bandes jaune, orangé et rouge paraissent jaunes; et les autres, noires ou grises, parce qu'elles ne reçoivent pas de rayons qu'elles soient susceptibles de réfléchir. Avec une semblable lumière, le visage prend une teinte livide, les rayons rouges que la peau est propre à réfléchir manquant dans la lumière qui l'éclaire.

4° Quand le corps est transparent, il est évident que les rayons qui le traversent et émergent, sont ceux qui n'ont pas été réfléchis par les particules qu'ils ont rencontrées; la lumière transmise et la lumière réfléchie pourront donc présenter des couleurs différentes. C'est, en effet, ce qui a lieu. Par exemple, l'or en feuilles frappé par la lumière blanche, laisse passer des rayons d'un vert bleuâtre, tandis qu'il réfléchit les rayons jaunes, et si la couleur des rayons transmis est modifiée par la chaleur, la couleur des rayons réfléchis est aussi modifiée (2048). M. Faraday a formé des dépôts pulvérulents, par la décharge électrique à travers des fils métalliques dans l'hydrogène; il a vu le cuivre, l'étain, le zinc, le palladium, l'aluminium, qui sont pourpre, blanc brillant, blanc, gris, blanc, par réflexion; être vert, brun, brun ou gris bleuâtre, brun, brun ou orangé, par transmission.

Halley étant descendu sous l'eau à une profondeur de plusieurs brasses, dans une cloche à plongeur, vit de couleur cramoisie, le dessus de sa main, sur laquelle tombaient les rayons solaires, passant par une ouverture vitrée, tandis que le dessous, illuminé par la lumière réfléchie par les parties profondes de l'eau, paraissait vert; d'où Newtnn conclut que l'eau laisse passer les rayons rouges et réfléchit les rayons violets et bleus. Hassenfratz a vérifié cette explication, au moyen d'un long tube noirci en dedans, fermé par des glaces et rempli d'eau pure, à travers laquelle il faisait passer les rayons solaires. La lumière sortait successivement blanche, jaune, orangée ou rouge, quand la longueur de la colonne d'eau augmentait. Des diaphragmes annulaires, placés en différents points du tube, paraissaient noirâtres du côté de l'observateur, au point où la lumière était encore blanche, d'un violet faible là où elle était jaune, bleus là où elle était orangée, verts là où cette lumière était rouge. Le diaphragme était éclairé par la lumière réfléchie par les molécules d'eau, lumière qui présentait la couleur complémentaire de celle qui était transmise. La belle lumière bleue qui illumine l'intérieur de la grotte d'azur, dans l'île de Capri, est due à la réflexion sur les molécules de l'eau, des rayons lumineux qui pénètrent dans la mer par l'ouverture surbaissée par laquelle entrent les bateaux, et qui ne laisse passer qu'une faible quantité de lumière directe.

On pourrait croire que la couleur par transmission devrait toujours être complémentaire de la couleur par réflexion; mais il n'en serait ainsi qu'autant

qu'il n'y aurait aucune partie de lumière absorbée. Par exemple, il y a des corps rouges par réflexion et par transmission ; c'est qu'ils réfléchissent une partie des rayons rouges incidents, laissent passer le reste, et absorbent ou éteignent les rayons des autres couleurs.

5° Les proportions de lumière de chaque couleur réfléchies par un corps, et par conséquent sa couleur, dépendent de l'arrangement des molécules de sa surface. Or, la chaleur, modifiant la distance des molécules, on conçoit qu'elle change la couleur des corps. Gay-Lussac a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet; il projetait les corps colorés, sur des morceaux de porcelaine portés à une température de 100° à 400°. En général, les couleurs se foncent par la chaleur; ainsi le vermillon, l'oxyde rouge de mercure, le minium passent au rouge carmin ou au violet; l'azotate de cobalt passe du rouge vineux au bleu, etc. Nous avons vu comment M. Faraday a prouvé cette influence de la chaleur et aussi celle de la compression, sur la couleur des pellicules de certains métaux (2048).

Les corps ne présentent pas la même couleur quand ils sont polis ou non polis : le marbre, le bois dépolis ont une couleur terne qui ne permet pas de distinguer les veines ; mais vient-on à mouiller le marbre ou à vernir le bois, la teinte devient plus foncée et les veines apparaissent. Il y a des corps qui changent de couleur quand on les regarde sous une obliquité différente ; ce qui tient, pour les corps à surface unie et homogène, à la proportion différente de lumière blanche réfléchie spéculairement, et aussi à ce que la proportion diffuse des rayons réfléchis change avec l'incidence, suivant des lois différentes pour chacun d'eux (1899). — Les corps présentent souvent des couleurs différentes quand ils sont en poudre ou en masse. Les métaux en poudre impalpable sont souvent noirs; ils absorbent donc tous les rayons; tels sont le platine, le fer... Le pouvoir absorbant pour la chaleur présente un phénomène semblable.

Il resterait, pour compléter cette théorie, tout-à-fait semblable à celle que Melloni a établie sur la thermochrose des corps (II, 741), à expliquer par quel phénomène certains rayons sont réfléchis diffusément, pendant que d'autres sont transmis ou absorbés. Nous verrons plus tard comment Newton et d'autres physiciens ont cherché à rattacher ce phénomène à celui des couleurs qui se produisent dans les lames minces.

2057. Analyse de la couleur des corps et des sources lumineuses. — Les couleurs des corps sont généralement composées; ainsi les matières tinctoriales, les pierres précieuses, les fleurs les plus éclatantes, nous réfléchissent des rayons composés, comme on peut s'en assurer en les regardant à travers un prisme; les bords parallèles aux arêtes paraissent irisés. Pour analyser ces couleurs, on applique sur la surface du corps une feuille de papier noir présentant une fente étroite, à bords soigneusement noircis ; ou bien, quand cela est possible, on recouvre cette surface de noir de fumée, en laissant à découvert une bande très étroite. On regarde ensuite cette bande, bien éclairée, à travers un prisme parallèle à sa direction, et l'on aperçoit un

spectre dans lequel on distingue les couleurs simples qui forment la couleur composée du corps. Cette méthode n'est pas à l'abri de toute erreur, parce qu'il y a, le plus souvent, de la lumière blanche mêlée à la lumière colorée que réfléchit la surface. Le noir de fumée même est dans ce cas ; on voit de légères couleurs partout où il y a quelque inégalité à sa surface. Mais cette lumière blanche étant en petite quantité, quand le corps n'est pas poli et qu'on évite de recevoir les rayons réfléchis spéculairement, il est assez facile de distinguer le spectre très faible qu'elle forme, de celui que produisent les rayons diffusés par le corps.

2058. Couleurs des flammes. — Pour analyser les couleurs des flammes, on les place derrière un écran noir présentant une fente étroite, et l'on regarde le trait lumineux, à travers un prisme parallèle à la fente. C'est par ce moyen, comme nous l'avons vu, qu'on a étudié les raies du spectre formé par les différentes parties de la flamme, et que plusieurs physiciens, entre autres MM. Plucker, Moigno, avaient pu constater la possibilité de reconnaître la présence de certains métaux dans une flamme, avant les recherches étendues de MM. Kirchhoff et Bunsen (2041).

Le spectre des flammes colorées présente le plus souvent de larges bandes noires indiquant l'absence de certaines couleurs ; telles sont les flammes du cyanogène, de l'oxyde de carbone, les flammes colorées par des sels. — Pour étudier l'influence des sels, on les dissout dans l'alcool d'une lampe, ou bien on en saupoudre la mèche. On reconnaît ainsi que les sels de soude colorent la flamme en jaune ; ceux de potasse, en violet pâle ; ceux de chaux, en rouge de brique ; l'acide borique, les sels de baryte, en vert ; la strontiane, en pourpre ; et les sels de cobalt, en bleu. Le sulfate de fer, l'antimoine, l'arsenic, rendent la flamme blanche.

Lampe monochromatique. — Quand on projette du soufre dans un creuset incandescent, la flamme est d'un jaune pâle à peu près simple. M. Brewster a imaginé une lampe *monochromatique*, très utile dans certaines expériences d'optique. C'est une lampe à alcool, dont l'alcool a été mêlé avec un quart d'eau saturée de sel marin. La flamme est jaunâtre et sensiblement homogène. Cependant, un prisme de 60° permet de distinguer, sur les bords, des franges vertes et violettes extrêmement faibles.

2059. Résultats du mélange des couleurs. — Pour trouver par l'expérience le résultat du mélange de plusieurs couleurs, on emploie différents moyens : 1° on couvre avec du papier noir, en tout ou en partie, certains secteurs du disque avec lequel Newton recomposait la lumière blanche (2030), et l'on voit, en le faisant tourner, quel est l'effet produit par le mélange des couleurs qu'on a laissées à découvert. On peut encore, comme l'ont fait Newton, Castel, Mayer, Lambert, Forbes, etc., mélanger des matières colorées en poudre fine ; mais on n'obtient ainsi que des couleurs ternes ou rabattues, à cause de la grande quantité de lumière absorbée ; ces couleurs sont comme si elles étaient faiblement éclairées. Pour avoir des résultats satisfaisants, il faut

opérer sur les rayons simples du spectre solaire. 2° On emploie la disposition de la *fig.* 1544; on intercepte les rayons colorés qui ne doivent pas entrer dans le mélange, et l'on a au foyer, une image colorée d'un éclat qui dépasse tout ce qu'on peut obtenir au moyen des couleurs artificielles. 3° On reçoit sur quelques-uns des miroirs de l'appareil (*fig.* 1545), les rayons du spectre présentant les couleurs que l'on veut mélanger, et on les renvoie par réflexion sur un même point d'un écran blanc.

Méthode de M. Helmholtz. — Il est bien difficile, par les procédés qui précédent, d'opérer sur deux faisceaux parfaitement homogènes. M. Helmholtz a employé une méthode qui lui a permis d'opérer sur des rayons de couleur simple[1]. Il regardait à travers un prisme vertical, deux fentes étroites formant un angle droit *ab*, *a'b* (*fig.* 1562), inclinées à 45° par rapport aux arêtes du prisme. Ce prisme étant placé à environ 4 mètres des fentes, et dans la position du minimum de déviation, on apercevait 2 spectres *rv*, *r'v'*, dans lesquels on pouvait distinguer, en s'aidant d'une lunette, des raies noires parallèles aux fentes. Ces deux spectres se superposaient en partie, et les dimensions des fentes étaient telles, que chaque bande colorée *oo* de l'un des spectres croisait toutes les bandes colorées de l'autre.

Pour connaître le résultat de la combinaison de deux couleurs, on dirigeait la lunette de manière que le point de croisement de son réticule se projetât sur la combinaison que l'on voulait examiner, puis on plaçait l'œil à une distance de 50 à 60cm de la lunette, de manière à ne voir qu'un très petit espace autour de ce point de croisement; un écran percé d'un petit trou indiquait la position de l'œil. On appréciait ainsi la teinte composée, sans être influencé par les couleurs voisines; puis, cachant successivement l'une et l'autre fente, on voyait les couleurs simples qui avaient produit cette teinte.



Fig. 1562.

Pour faire varier le rapport entre les quantités de lumière des couleurs composantes, on inclinait le prisme de manière à le rapprocher de la position parallèle à l'une des fentes; le spectre de celle-ci se rapprochait de la forme d'un rectangle, et les couleurs y étaient plus resserrées, et par conséquent plus vives, que dans l'autre spectre, où avait lieu l'effet inverse. Quand les intensités des deux couleurs devaient être très différentes, on recouvrait l'une des fentes avec du papier huilé ou non huilé.

M. Helmholtz a aussi cherché l'effet produit par la réunion de trois couleurs, en ajoutant une troisième fente, de manière à obtenir trois spectres superposés en partie. — Il a aussi cherché le résultat du mélange de deux couleurs, par les méthodes que nous avons indiquées plus haut (2054).

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVI, p. 500.

Voici les principaux résultats trouvés par M. Helmholtz : 1° deux couleurs forment par leur mélange une couleur composée qui est quelquefois identique avec une des couleurs simples du spectre, mais qui souvent aussi en diffère sensiblement. Par exemple, le jaune verdâtre et le bleu verdâtre du spectre donnent un vert beaucoup plus terne que celui du spectre. Ce dernier vert, le violet, et surtout le rouge, ne peuvent être obtenus exactement par le mélange de deux autres couleurs. 2° Un résultat important, c'est que la couleur produite par la réunion de trois couleurs simples, est différente de celle que l'on obtiendrait en combinant l'une d'elles avec la couleur simple du spectre, semblable au résultat de la combinaison des deux autres. Par exemple, le rouge et le vert bleuâtre du spectre donnent du *jaune*; et le rouge, avec le vert bleuâtre obtenu par le mélange du vert et de l'indigo, donne du *blanc*. 3° Il existe beaucoup de combinaisons de trois couleurs qui donnent du blanc. 4° Il est impossible, avec trois couleurs seulement, de produire toutes les couleurs du spectre, d'une manière un peu satisfaisante ; il faut, pour cela, se servir de cinq couleurs au moins : *rouge, jaune, vert, bleu* et *violet*. Le fait qui avait servi de point de départ à l'hypothèse de trois couleurs primitives, se trouve donc inexact (2050). Si l'on peut réussir en mélangeant trois couleurs matérielles, cela tient au peu d'éclat des nuances obtenues, et à ce que l'on ne prend pas la peine de les comparer à celles du spectre, dont elles diffèrent notablement dans la plupart des cas. Les couleurs adoptées, *rouge, jaune, bleu,* ne seraient même pas les plus favorables ; il vaudrait mieux adopter le rouge, le vert et le violet; mais encore n'obtiendrait-on que des imitations très imparfaites des couleurs du spectre.

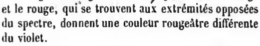
2060. Construction de Newton. — Après avoir fait un grand nombre d'expériences par quelques-unes des méthodes précédentes, Newton a formulé une règle géométrique, au moyen de laquelle on peut trouver approximativement le résultat du mélange de plusieurs couleurs : on divise une circonférence (*fig.* 1563) en 7 parties correspondantes aux 7 couleurs du spectre, et proportionnelles aux nombres $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{9}$; un calcul trés simple donne alors, pour les valeurs des arcs en degrés :

Rouge.	Orangé.	Jaune.	Vert.	Bleu.	Indigo.	Violet.
60° 45′ 34″	34° 10′ 38″	54° 41′ 1″	60° 45′ 34″	54° 41′ 3″	34° 10′ 38″	60° 45′ 34″

On marque les centres de gravité *r, o, j, u, b, i, v*, de chacun de ces arcs ; et pour obtenir le résultat du mélange de plusieurs couleurs, on suppose appliquées aux centres de gravité des arcs qui leur correspondent, des forces parallèles proportionnelles aux quantités que l'on veut mélanger; puis, on cherche le point d'application de la résultante de ces forces. La couleur cherchée sera celle de l'arc du secteur dans lequel tombera ce point d'application. Par exemple, pour connaître le résultat du mélange de rayons rouges, bleus et jaunes, ayant des intensités entre elles comme les nombres n_r, n_b, et n_j ; il faudra chercher, par la méthode connue (I, 69), le point d'application de la résultante de trois forces

parallèles égales à n_r, n_b et n_j, appliquées en r, b et j ; si ce point tombe en n, on en conclura que le mélange donne du jaune, et du jaune tirant sur le vert, parce que le point n se trouve plus près de la limite du vert que de celle de l'orangé. Plus le point n sera placé près du centre c, plus la nuance sera lavée de blanc. Si le point n tombait en c, le mélange formerait du blanc. C'est ce qui arrive entr'autres, quand on combine les 7 couleurs dans les proportions même des arcs qui les représentent ; la résultante étant alors appliquée au centre de gravité c de la circonférence.

On conclut de la règle de Newton que : 1° deux couleurs simples qui se suivent sur la circonférence donnent une nuance intermédiaire. Il faut cependant excepter le rouge et le violet, qui ne se suivent pas dans le spectre. 2° Deux couleurs séparées par une troisième, donnent cette dernière. Ainsi, le rouge et le jaune donnent de l'orangé ; l'orangé et le vert, du jaune, etc. L'indigo et le rouge, qui se trouvent aux extrémités opposées du spectre, donnent une couleur rougeâtre différente du violet.



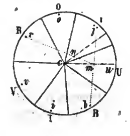


Fig. 1563.

Biot a réduit cette méthode en formule générale. Pour cela il calcule les coordonnées des centres de gravité des arcs, en prenant pour axe des abcisses, la droite passant par le point de séparation des arcs correspondants au violet et au rouge, et par le centre pris pour origine. Ces coordonnées étant calculées, il multiplie chacune d'elles par le nombre de rayons de la couleur correspondante qui doit entrer dans le composé, il fait la somme de tous ces produits ; et, la divisant par la somme totale des rayons à composer, il obtient les coordonnées du point d'application de la résultante. Ces coordonnées sont, en désignant les nombres de rayons de chaque couleur par l'initiale de son nom, sauf pour le violet qui est représenté par u,

$$X = \frac{(r+u)\ 0{,}82284 + (o+i)\ 0{,}207398 - (j+b)\ 0{,}513992 - v\ .\ 0{,}353796}{r+o+j+v+b+i+u.}$$

$$Y = \frac{(r-u)\ 0{,}48235 + (o-i)\ 0{,}963163 + (j-b)\ 0{,}813736}{r+o+j+v+b+i+u.}$$

De ces coordonnées on peut déduire la distance D du point d'application au centre du cercle, ainsi que l'angle α que fait cette distance avec l'axe des x; car on a $\tang \alpha = Y : X$ et $Y = D \sin \alpha$, ou $X = D \cos \alpha$.

La valeur de α fait connaître dans quel secteur tombe le point d'application, et le rapport de D à $1 - D$ la proportion de lumière simple et de lumière blanche qui compose la couleur résultante.

Newton a donné la méthode précédente comme une règle empirique représentant les résultats qu'il a obtenus en formant au foyer d'une lentille, des couleurs composées contenant des proportions connues de lumière simple.

Cependant il faut la considérer comme ne donnant qu'une approximation, dont on est d'autant plus disposé à se contenter, qu'on n'a pas ordinairement sous la main de moyen d'apprécier les couleurs avec certitude. Remarquons aussi que cette règle ne se vérifie pas toujours aussi exactement que l'avait cru Newton ; nous avons vu, par exemple, que le mélange des rayons bleus et jaunes peut donner du blanc et non du vert (2053).

2061. Nomenclature des couleurs. — Il a régné pendant longtemps une grande confusion dans la manière de désigner les couleurs. Les dénominations appliquées à une même nuance diffèrent même souvent dans les diverses industries qui en font usage; le peintre, l'émailleur, le mosaïste, le verrier, le teinturier, n'ont pas la même nomenclature. Les termes employés sont d'ailleurs choisis d'une manière très capricieuse : tantôt ils sont empruntés aux objets naturels ou aux substances qui présentent ces couleurs, tantôt au pays qui les fournit; d'autrefois ce sont des noms d'hommes, des noms de fantaisie, des noms bizarres. Des tentatives assez nombreuses ont été faites pour mettre de l'ordre dans ce chaos; mais c'est à M. Chevreul qu'est due la première solution satisfaisante de la question[1].

Tons et nuances. — M. Chevreul donne aux mots *ton* et *nuance*, des valeurs différentes bien déterminées. Il appelle *nuance*, le résultat du mélange des couleurs pures en diverses proportions. Les nuances peuvent ensuite être mélangées de blanc ou de noir en quantité variable, ce qui donne pour chacune d'elles une infinité de *tons*. Le ton d'une nuance est d'autant plus affaibli ou *abaissé* qu'il s'y mêle plus de blanc; et d'autant plus foncé ou *élevé* qu'il s'y mêle plus de noir. Les couleurs mêlées de noir sont celles que les peintres appellent *rabattues*; ce sont des couleurs qui réfléchissent peu de lumière; et en effet, si l'on éclaire de moins en moins une surface peinte avec une couleur franche, elle paraît de plus en plus sombre, et finit par paraître noire. C'est ce que l'on peut remarquer quand le jour fuit; toutes les couleurs se foncent et tournent au noir.

Cercle chromatique. — M. Chevreul a formé un tableau de 72 nuances, passant graduellement des unes aux autres, avec 20 tons pour chacune d'elles, les uns produits par des mélanges de blanc en proportion croissante, les autres par des mélanges de noir. Imaginons un cercle divisé en 72 secteurs égaux. Trois secteurs équidistants correspondent aux trois couleurs principales, *rouge*, *jaune* et *bleu*. A égale distance de ces trois couleurs, sont placées celles que l'on forme en les mélangeant deux à deux ; l'*orangé* entre le rouge et le jaune, le *vert* entre le jaune et le bleu, le *violet* entre le rouge et le bleu ; puis, entre ces six nuances, les nuances intermédiaires, et ainsi de suite, de manière que le cercle se trouve contenir 72 nuances, passant graduellement des unes aux autres. Les secteurs sont partagés en cases quadrangulaires, par vingt circonférences concentriques, et dans les vingt cases de chaque secteur sont placés

[1] *De la loi du contraste simultané des couleurs*, p, 87.

les *tons* de la couleur qui lui appartient. Au centre, est un petit cercle blanc, à partir duquel la nuance se fonce en perdant du blanc, jusqu'à devenir pure; puis le ton se hausse de plus en plus en prenant du noir, jusqu'au contour du disque qui est bordé de noir. Il y a donc une série circulaire de cases qui contiennent les nuances pures avec leur maximum d'intensité, et à partir de chacune desquelles les tons s'affaiblissent en allant vers le centre, et se foncent au contraire en s'éloignant du centre. La série de couleurs contenues dans un même secteur forme une *gamme* des *tons* de la nuance correspondante. Si l'on part d'une case pour marcher suivant la circonférence, on a la série des 72 nuances correspondantes au ton de cette circonférence. On a ainsi un tableau de 1440 couleurs, qui forment des types suffisamment rapprochés pour les besoins de l'industrie, et auxquels il sera bon d'ajouter la gamme du blanc, c'est-à-dire la série des tons gris allant du blanc au noir. Un semblable tableau, construit avec des couleurs inaltérables, par exemple en porcelaine peinte, rendra de grands services à l'industrie, en permettant de s'entendre sur les couleurs, que l'on pourra désigner par les numéros du secteur et de la circonférence sur lesquels elles se trouvent.

M. Lecocq a disposé les cases colorées d'une autre manière. Il divise la surface d'une sphère en espaces quadrangulaires, au moyen de méridiens et de paralléles. A l'équateur sont les couleurs franches. Chacune d'elles se fonce sur chaque méridien en allant vers l'un des pôles terminé par une tache noire, et s'éclaircit en allant vers l'autre pôle où se trouve une tache blanche. Il serait plus commode d'employer un cylindre, dont une des bases serait bordée de noir et l'autre de blanc, et qui présenterait à égale distance de ces bases une zone contenant les nuances pures. On pourrait encore développer ce cylindre sur un plan, ce qui permettrait d'embrasser d'un seul coup d'œil l'ensemble des nuances et de leurs tons. En répétant à l'une des extrémités du tableau quelques-unes des gammes de l'extrémité opposée, on y trouverait chacune des gammes, juxtaposée à celles qui en diffèrent le moins. Sous cette forme, le tableau serait d'une exécution plus facile, surtout si l'on voulait le fabriquer en porcelaine.

§ 4. — PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES DES RAYONS COLORÉS.

I. Effets chimiques. — Photographie.

2062. Les différents rayons colorés qui composent le spectre présentent des intensités *lumineuses*, *phosphorogéniques* et *calorifiques* inégales, et produisent des effets *chimiques* différents. Nous allons, pour terminer l'étude des rayons colorés, passer en revue les propriétés particulières qu'ils possèdent à ces différents points de vue.

2063. Actions chimiques de la lumière. — La lumière est capable de produire certaines actions chimiques quo la chaleur qui l'accompagne ne peut provoquer. Par exemple, la lumière détermine la combinaison du chlore et de l'hydrogène; elle décompose les sels d'argent, d'or, de platine, qui abandonnent une partie de leur métal. Tout le monde connaît l'action des rayons solaires sur les substances colorantes d'origine organique; les couleurs appliquées sur les tissus, sur les papiers de tenture, pâlissent rapidement au soleil. On blanchit les toiles écrues, la cire, en les exposant au soleil dans des conditions convenables. La lumière est nécessaire aux actions chimiques qui ont lieu dans les feuilles des plantes pendant l'acte de la respiration ; elle préside à la formation de la matière colorante des feuilles et des fleurs. A l'ombre, les végétaux se développent mal ; les parties que l'on tient dans l'obscurité restent d'un blanc jaunâtre, et sont plus molles que celles qui croissent au grand jour. Les animaux ont aussi besoin de l'action de la lumière ; dans l'obscurité, ils languissent. Les coquilles abritées sous des rochers, ne présentent que des couleurs pâles, comparativement à celles qui reçoivent librement la lumière du jour.

Les effets que la lumière peut produire dans les corps consistent : 1° dans des décompositions chimiques, comme la décompositiou des sels, la décoloration des substances végétales ; 2° dans des combinaisons, comme celle du chlore, du brome, de l'iode avec l'hydrogène, de la résine de gaïac avec l'oxygène ; 3° dans des effets physiques sans changement de composition chimique, comme la modification dans l'arrangement des molécules, qui fait que le phosphore change de couleur sous l'influence de la lumière.

2064. Activité chimique des divers rayons lumineux. — Toutes les sources de lumière n'excitent pas les actions chimiques avec la même énergie ; la lumière solaire l'emporte beaucoup à cet égard sur toutes les autres. De plus, tous les rayons simples ne sont pas doués de la même efficacité. Scheele, qui a découvert, vers 1770, l'action de la lumière sur le chlorure d'argent, avait observé l'inégalité d'action des divers rayons du spectre sur cette substance, et reconnut que l'action résidait surtout dans les rayons violets. Seebeck a annoncé plus tard que l'action croît des rayons rouges aux rayons violets. Ritter et Wollaston découvrirent ensuite, en 1801, que le chlorure d'argent est fortement noirci dans l'espace qui s'étend au-delà du violet et où il n'y a pas de rayons visibles ; ce qui a conduit à distinguer des *radiations chimiques*, que l'on a cru d'abord différentes des rayons lumineux. M. Berard ayant rassemblé au foyer d'une lentille, les rayons dispersés compris entre le vert et le rouge, puis ceux qui sont compris entre le vert et le violet, trouva que le chlorure d'argent placé au foyer éblouissant du premier faisceau n'avait éprouvé, au bout de deux heures, aucune coloration, tandis que, au foyer très peu brillant du second, le chlore était noirci en quelques minutes. Gay-Lussac et Thénard ont vu le mélange de chlore et d'hydrogène détoner sous l'influence des rayons violets et n'éprouver aucune action sous

celle des rayons rouges [1]. M. Seebeck ayant introduit le mélange sous des cloches en verre bleu et en verre rouge placées sur l'eau, vit ce liquide remplir la cloche bleue en moins d'une minute, par l'absorption de l'acide chlorhydrique formé, tandis que l'action avait lieu avec une extrême lenteur dans la cloche rouge.

En 1839, fut publiée la découverte de Daguerre. Une couche imperceptible d'iodure d'argent reçoit les images formées dans la chambre noire, cette couche est impressionnée à des degrés différents, suivant que la lumière est plus ou moins vive, et l'on peut conserver l'image formée. Cette découverte admirable, sur laquelle nous reviendrons (1926), a fortement attiré l'attention sur les

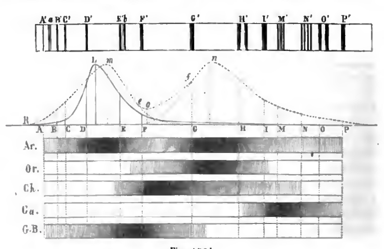


Fig. 1564.

actions chimiques de la lumière, et a provoqué les recherches de divers physiciens, parmi lesquels MM. Herschel, Draper, Moser, Matteucci, Niepce de Saint-Victor, et E. Becquerel.

2065. Expériences de E. Becquerel [2]. — Dans ces expériences, les actions chimiques des rayons du spectre ont été appréciées, soit par les courants électriques qu'elles engendrent, soit par les changements de teinte de certaines substances. Occupons-nous d'abord du second moyen.

Le spectre bien pur, et rendu fixe au moyen d'un héliostat, était formé par un prisme en flint, de 60°, noirci partout où la lumière ne devait pas le traverser. Ce spectre laissait voir un grand nombre de raies ; on pouvait en faire varier la longueur, et par conséquent l'éclat, en déplaçant la lentille placée auprés du prisme (2032). Voici les principaux résultats obtenus :

[1] *Rech. physico-chimiques*, t. II, p. 189 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 1re s., LXXXII, 328.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IX, p. 257.

1° Les actions chimiques n'ont pas lieu, pour les différentes substances, dans les mêmes parties du spectre. Ainsi, le chlorure d'argent commence à noircir à l'extrême violet entre les raies H et G, et la coloration s'étend peu à peu presque jusqu'en F, et du côté opposé bien au-delà du violet visible. Les autres sels d'argent, iodure, bromure, les plaques daguerriennes, se comportent de la même manière, seulement la coloration ne s'étend pas à la même distance au-delà du violet, et le maximum n'occupe pas exactement la même position. On voit en A'H' (*fig.* 1564) les principales raies du spectre solaire, et en Ar, depuis F jusqu'en P le *spectre chimique* formé sur le chlorure d'argent, c'est-à-dire les teintes plus ou moins foncées correspondant aux différents points du spectre lumineux. Pour d'autres substances, le maximum ne se montre pas au même endroit du spectre. Par exemple, le bichromate de potasse, dont l'acide chromique se change en oxyde de chrome, et dont on voit le spectre chimique *Ch*, commence à se colorer vers la raie F. — La résine de gaïac, *Ga*, bleuit à partir de H jusqu'en P, et le maximum correspond à M. Si l'on emploie le gaïac bleui d'avance par les rayons solaires, GB, on le voit blanchir dans le spectre, et l'effet s'étend de A en H, le maximum étant vers la raie F. La lumière agit donc de deux manières sur le gaïac, comme Wollaston l'avait déjà reconnu : les rayons les plus réfrangibles l'oxydent en le faisant passer au bleu, et les rayons les moins réfrangibles détruisent cette oxydation en le ramenant au blanc jaunâtre. — Avec le chlorure d'or, *Or*, l'impression s'étend de E à I, et l'action est très lente. Mais Seebeck ayant trouvé qu'une fois l'action commencée elle continue d'elle-même dans l'obscurité, on peut, au bout d'une heure d'exposition dans un spectre brillant, enlever le papier et le laisser dans l'obscurité pendant plusieurs jours, au bout desquels l'effet est bien marqué. — M. Herschel a remarqué, après Grotthus, que les rayons qui décolorent une substance végétale ont très souvent une couleur complémentaire de celle de cette substance.

2° Le *spectre chimique* présente des raies, de la même couleur que la substance avant qu'elle n'ait été impressionnée, et occupant précisément la place des raies de Fraunhofer. On en distingue un grand nombre au-delà du violet, quand l'action chimique s'y étend. On voit en A'P' (*fig.* 1564) les principales raies du spectre chimique; ce sont celles de Fraunhofer, auxquelles on a ajouté celles qui sont distribuées de H' en P'.

3° **Rayons continuateurs.** — Si, au lieu de préparer du chlorure d'argent dans une obscurité complète, on l'expose un instant à la lumière diffuse avant de le soumettre à l'action des rayons dispersés, on voit l'action se manifester en même temps dans toutes les parties du spectre, même dans le rouge extrême. Les rayons les moins réfrangibles ont donc la propriété de *continuer* l'action, une fois qu'elle est commencée; M. E. Becquerel les nomme *rayons continuateurs*, par opposition au nom de *rayons excitateurs* qu'il donne aux rayons capables de commencer l'action. Il résulte de ce qui précède que les rayons excitateurs d'une substance ne sont pas les mêmes que pour une autre.

Dans la *fig.* 1564, la partie AF du spectre chimique Ar formé sur le chlorure d'argent, est produite par les rayons continuateurs.

2066. Actinomètre électro-chimique. — Cet appareil est destiné à comparer les effets chimiques des divers rayons du spectre, par les intensités des courants électriques produits. *ab* (*fig.* 1565) est une petite cuve rectangulaire de 6 à 10^{cm} de hauteur, remplie d'eau rendue légérement conductrice par un peu de sulfate de soude, ou d'acide sulfurique ou nitrique, et pouvant glisser sur une table, le long d'une régle divisée. Deux lames *l*, *l'*, d'argent bien pur, recouvertes, par le procédé de Daguerre (2070), d'une mince pellicule de chlorure, de bromure ou d'iodure d'argent, sont plongées parallélement l'une à l'autre, dans le liquide, où elles sont soutenues par des montants en cuivre *t*, *t'*, et communiquent avec un réomètre de 3000 tours au moins. Les deux plaques sont aussi identiques que possible, de manière que le courant, qui ne manque pas de se produire au moment où on les plonge, cesse au bout d'un temps plus ou moins long. Le côté sensible d'une des lames est tourné vers une des faces de la cuve, face qui est transparente, tandis que les autres sont opaques. Au-devant de la face transparente se trouve un écran *e* muni d'une fente verticale dont on peut faire varier la largeur.

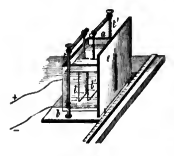


Fig. 1565.

L'appareil étant installé dans l'obscurité la plus compléte, on fait tomber sur l'écran un spectre fixe formé par un prisme vertical, et l'on place la cuve, de manière que la fente laisse passer les rayons que l'on veut éprouver, rayons dont on connaît la couleur, en glissant un écran blanc derrière les fentes. On enlève ensuite cet écran, et les rayons tombent sur une des lames sensibles. Aussitôt l'aiguille du réomètre se dévie de manière à indiquer que la lame impressionnée prend l'électricité positive; ce qui devait être, puisqu'il se fait une décomposition (III, 1448). On observe l'angle d'impulsion, puis, déplaçant la cuve, on opére avec d'autres rayons. On sait, au moyen de la régle divisée, quelles sont les raies qui se projettent sur la plaque.

On reconnaît ainsi, en commençant par l'extrémité rouge, que le courant, et par conséquent l'action chimique, augmente à partir de P, atteint son maximum entre les raies H et G, et devient trés faible à partir de F, comme l'indique la courbe P*n*F (*fig.* 1564). Si, après avoir fait passer successivement toutes les parties du spectre par la fente, on fait revenir la cuve en sens inverse, on trouve des déviations prononcées dans la partie AF, avec un maximum entre D et E, comme l'indique la courbe *em*R, tandis que les actions restent les mêmes qu'auparavant dans la partie FP. C'est que les rayons compris entre F et A, tombant sur une surface qui a reçu l'action des *rayons*

excitateurs lors de la première expérience, agissent alors comme *rayons continuateurs*. Si l'on ramène la fente dans le violet, puis, qu'on la reporte dans les rayons continuateurs, l'action, invariable dans les premiers, est plus vive encore dans les derniers, leur effet étant d'autant plus prononcé que la couche a été plus fortement impressionnée. Le tableau qui suit renferme les principaux résultats obtenus par ce moyen sur les sels d'argent, comparés aux intensités lumineuses évaluées par Fraunhofer par une méthode que nous expliquons plus loin (2081). Partout, les maximum sont pris pour unité.

COULEURS DU SPECTRE.	INTENSITÉ LUMINEUSE.	RAIES.	INTENSITÉ DU COURANT.	RAYONS.
Extrême rouge.	insensible	A	0,05	
	0,0320	B	0,20	
Orangé.	0,0940	C	0.32	
	0 6400	D	0,68	Rayons continuateurs.
Jaune..	1. maximum ; à 0,1 de DE à partir de D.		1, maximum ; à 0,6 de DE à partir de D.	
Vert.	0,4800	E	0,75	
Commencement du bleu. .	0,1700	F	0,25	
			0,20, minimum, près de F.	
Indigo.	0,0310	G	0,56	
Violet extrême.	0,0056	H	1, maximum ; à 0,4 de GH à partir de G.	
»	»		0,72	Rayons excitateurs.
»	»	I	0.40	
»	»	M	0,27	
»	»	N	0,17	
»	»	O	0.13	
»	»	P	0,05	

Si l'on représente par des ordonnées, les intensités électriques inscrites dans ce tableau, on obtient la courbe R*mon*P (*fig.* 1564), présentant deux maximum *m* et *n* ; mais il ne faut pas oublier que la partie R*mo* correspond à des effets qui n'ont lieu qu'après que la surface a été impressionnée à l'avance. L'arc *ef* est probablement formé par la réunion de deux portions de courbe particulières, *e*G et *f*F correspondant, l'une aux rayons excitateurs s'ils agissaient seuls, l'autre aux rayons continuateurs. La courbe RLI représente les intensités lumineuses, d'après Fraunhofer.

Ces résultats, ainsi que ceux qui suivent, ont été confirmés sur une couche de chlorure, obtenue par décomposition électro-chimique de l'acide chlorhydrique, et recuite à 150° ou 200°. Cette couche, dont nous indiquons plus loin les curieuses propriétés (2077), n'est impressionnée que par les parties

visibles du spectre; elle est sensible aux rayons de la flamme d'une bougie, et assez épaisse pour que l'action chimique produite en un point par les rayons d'une lampe Carcel, reste constante pendant plusieurs heures. Il en résulte qu'on pouvait observer les positions d'équilibre de l'aiguille du réomètre, au lieu des arcs d'impulsion.

2066. Absorption des rayons chimiques par les lames transparentes. — Biot est le premier qui ait cherché si les lames transparentes et incolores arrêtent certains rayons chimiques, comme elles arrêtent certains rayons lumineux et calorifiques. Il a reconnu que les effets chimiques sont, en général, retardés par l'interposition de semblables lames[1]. M. Malaguti a fait des expériences analogues avec divers liquides. M. E. Becquerel a repris la question; il a opéré sur un grand nombre de substances: eau, alcool, acides, sels solides ou dissous, huiles, essences, verres, etc. La couche sensible était, tantôt une lame d'argent iodurée, rendue plus sensible par le chlore et le brome; tantôt une feuille de papier sensible de M. Talbot, propre à la photographie (2073), et que l'on plongeait, après qu'elle avait subi l'action de la lumière, dans une solution aqueuse d'acide gallique, qui la colorait partout où la lumière avait agi. La surface sensible recevait, dans la chambre noire, deux spectres parallèles horizontaux, formés par deux faisceaux de rayons solaires passant par deux trous circulaires pratiqués dans un écran sur une même verticale, et traversant un prisme vertical en flint. Une lentille de 1 mètre de foyer, placée derrière le prisme, permettait de distinguer les principales raies. La lame transparente étant placée derrière le trou inférieur, on pouvait comparer les effets chimiques produits par les deux spectres. Une lame de flint était placée derrière le trou supérieur, pour conserver l'égalité des deux faisceaux, en faisant éprouver au plus élevé la perte que le plus bas éprouvait par la double réflexion sur les faces de la lame en expérience. Il fallait 10^m à 15^m pour observer les effets des rayons excitateurs, et une heure au moins pour les rayons continuateurs. Voici les principaux résultats obtenus avec des lames incolores :

1° L'interposition des *lames incolores*, solides ou liquides, ne modifie pas les actions chimiques dans la partie du spectre comprise entre les raies A et H; — 2° de H à P (*fig.* 1564), les actions restent aussi les mêmes, avec certaines substances, comme l'eau, l'alcool, l'acide sulfurique, etc., mais elles sont affaiblies, avec d'autres substances liquides ou solides, à partir de l'extrémité P, jusqu'à un point plus ou moins rapproché de la raie H; c'est-à-dire que les rayons chimiques les plus réfrangibles sont le plus absorbés, et que cette absorption a lieu dans la partie invisible HP du spectre, où les actions chimiques sur les sels d'argent sont assez faibles. Les effets s'arrêtent à la raie N avec l'acide azotique, l'essence de citron, etc., et à la raie H, avec la créosote, l'essence d'amandes amères, la solution aqueuse faible de sulfate de quinine;

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. VIII, p. 315.

— 3° la position du maximum n'est pas sensiblement changée par l'interposition de la lame incolore; — 4° avec les autres substances sensibles, c'est toujours dans la partie HP que la différence des deux spectres se manifeste. Ainsi, l'enduit de gaïac, qui ne bleuit que dans la partie HP, restera incolore quand les rayons traverseront une couche de créosote ou de sulfate de quinine; au contraire, les lames interposées n'auront aucun effet sur les substances qui, comme le gaïac bleui, ne sont impressionnées que de A en H; — 5° il est à remarquer que les rayons *lumineux*, compris dans l'espace HP, sont aussi absorbés par les couches de créosote, d'essence d'amandes amères, de solution de quinine; mais ces rayons sont si faibles que ces liquides n'en paraissent pas moins incolores.

Des expériences faites avec l'actinomètre, ont conduit aux mêmes résultats. On relevait d'abord les intensités des courants produits par l'action des différentes parties du spectre direct, puis ces intensités quand le faisceau avait traversé la lame incolore. Les résultats restent sensiblement les mêmes quand, au lieu d'un prisme en flint, on emploie un prisme de sel gemme, d'alun ou d'eau. Mais, avec des prismes formés d'autres liquides, ou un prisme en verre ordinaire, il n'en est plus de même; ces substances absorbent une partie des rayons chimiques les plus réfrangibles.

M. E. Becquerel a fait aussi beaucoup d'expériences avec des lames colorées; verres rouges, jaunes ou bleus, solutions de tournesol, de persulfocyanure de fer...... La surface sensible était formée d'iodure d'argent.... Il a reconnu, comme résultat général, que les rayons lumineux et les rayons chimiques sont absorbés dans les mêmes régions du spectre.

2067 Identité des rayons chimiques et des rayons lumineux. — M. E. Becquerel a conclu des nombreuses expériences qui précèdent, qu'il n'y a pas lieu de distinguer des *rayons chimiques* spéciaux, et que ce sont les rayons lumineux même qui produisent les effets chimiques. En effet, les rayons qui produisent les actions chimiques se réfléchissent et se réfractent comme les rayons lumineux de même réfrangibilité; les spectres lumineux et chimiques sont interrompus par les mêmes raies; les corps qui absorbent les rayons lumineux absorbent aussi les rayons chimiques de même réfrangibilité. De plus, MM. Fizeau et Foucault ont reconnu que les actions chimiques exercées au foyer d'une lentille par la lumière de l'arc voltaïque et la lumière Drummond sont dans le même rapport que leurs intensités lumineuses, et la grande différence de nature entre ces deux sources leur a permis de généraliser pour toutes les lumières blanches. Il n'y a donc pas, ainsi qu'on l'avait admis d'abord, de rayons chimiques mêlés aux rayons lumineux, et distincts de ces rayons. Mais, pour arriver à cette conclusion, il a fallu tenir compte des différences dans les intensités chimiques et lumineuses aux mêmes points, et remarquer que, si l'intensité lumineuse est trop faible pour que l'œil soit impressionné, l'action chimique peut néanmoins se manifester au bout d'un certain temps, temps qui n'a pas d'influence sur l'effet produit dans l'œil.

2068. De quelques effets chimiques de la lumière. — M. Niepce de Saint-Victor ayant exposé aux rayons solaires, de l'amidon en suspension dans l'eau additionnée d'une petite quantité d'un sel métallique, particuliérement d'azotate d'urane, a vu cet amidon se transformer en sucre de raisin et même, paraît-il, en sucre de canne. Ce phénoméne curieux donne la clef d'une foule de transformations qui se font dans les matiéres organiques sous l'influence de la lumiére ; telles que la formation du sucre pendant la maturation des fruits, l'altération des fibres végétales des toiles que l'on fait blanchir au soleil, etc.

De l'activité persistante de la lumière. — M. Niepce de Saint-Victor ayant exposé au soleil une feuille de papier trempée dans l'acide tartrique ou dans l'azotate d'urane, l'a renfermée dans une boîte de fer-blanc hermétiquement fermée, puis, au bout de plusieurs mois, il en a retiré le papier qui avait la propriété de décomposer l'azotate d'argent, comme s'il eût conservé les propriétés de la lumière qui l'avait éclairé. Cette interprétation du phénoméne n'a pas été admise par tout le monde. M. l'abbé Laborde explique le résultat par l'effet d'une émanation que la lumière a dégagée du papier, et qui n'a pas pu se dissiper pendant qu'il était renfermé. En effet, ayant enlevé le papier insolé, d'un cylindre dans lequel il avait séjourné pendant 4 heures, et ayant placé un papier sensible au couvercle du cylindre, qui fut refermé aussitôt, ce papier noircit comme si la feuille insolée était restée en sa présence. D'un autre côté, Thénard ayant fait passer un courant d'oxygène ozoné sur du papier ordinaire, lui a trouvé toutes les propriétés des papiers insolés. Le phénomène serait donc purement chimique, et la lumière ne ferait que provoquer les émanations qui doivent produire l'action. Quoi qu'il en soit de l'interprétation de ces phénomènes, ils méritent toute l'attention des physiciens.

2069. DE LA PHOTOGRAPHIE. — Le probléme qu'on se propose dans la *photographie* ou *héliographie*, consiste à fixer sur un écran, les images qui se forment dans la *chambre noire* (1995). Dés 1802, Wedgwood proposait de copier des vitraux d'église ou des gravures, au moyen de peaux ou de papiers enduits de chlorure ou d'azotate d'argent; mais il trouvait les images de la chambre obscure trop faibles pour agir sur la couche sensible dans un temps modéré. H. Davy parvint à imprimer l'image de petits objets, sur une surface sensible placée très près de l'objectif du microscope solaire. Charles, dans les cours qu'il faisait au Louvre, dessinait des silhouettes sur du chlorure d'argent: mais ces essais n'avaient que peu d'importance, parce que la couche sensible ne tardait pas à prendre une teinte uniforme, sous l'influence de la lumière. Toute la question consistait donc à rendre inaltérable l'empreinte obtenue. A la suite de travaux poursuivis de 1813 à 1829, Joseph-Nicéphore Niepce, militaire en retraite, eut la gloire de résoudre, le premier, ce difficile probléme; il obtint des copies de gravures, par l'action de la lumière sur une couche mince de bitume de Judée déposée sur une plaque argentée. Ces copies étaient rendues permanentes par l'immersion de la plaque dans un

mélange d'huile de lavande et de pétrole, qui dissolvait le bitume partout où il n'avait pas été altéré par la lumière, en le laissant presque intact dans les points qui en avaient subi l'action ; de manière que les tons clairs étaient représentés par la couche blanchâtre de bitume, et les parties sombres, par la surface métallique, placée de manière à ne pas renvoyer à l'œil de lumière réfléchie spéculairement. L'inventeur renonça à peu près à reproduire ainsi les images de la chambre noire, parce que les ombres se déplaçant, pendant les 10 à 12 heures nécessaires pour impressionner la plaque, on ne pouvait obtenir que des résultats confus. Niepce apprit, en 1826, que le peintre Louis-Mandé Daguerre, connu par l'invention du diorama, s'occupait de recherches semblables aux siennes; des relations s'établirent entre eux, et bientôt, ils s'associèrent pour continuer leurs essais. Daguerre perfectionna d'abord la méthode de Niepce; il remplaça le bitume de Judée par le résidu de la distillation de l'huile de lavande, rendit l'épreuve inaltérable en l'exposant aux vapeurs spontanées de l'essence de lavande, et il ne fallut plus que de 3 à 7 heures de chambre noire, pour obtenir une épreuve. Ce ne fut que plus tard que Daguerre découvrit l'extrême sensibilité de l'iodure d'argent, et qu'il imagina son procédé de photographie au mercure, qui excita, lors de sa publication, en 1839, un enthousiasme dont on rencontre peu d'exemples dans l'histoire de la science.

2070. Photographie sur métal, ou daguerréotypie. — Les plaques sur lesquelles on fixe les images de la chambre noire sont des lames de cuivre recouvertes, par le procédé du placage ou par la galvano-plastie, d'une couche d'argent pur de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{20}$ de millimètre d'épaisseur.

1° On commence par polir la surface argentée, au moyen d'un tampon de coton et de tripoli fin mêlé de quelques gouttes d'alcool, et l'on achève en frottant avec une peau de daim saupoudrée de colcothar; puis on essuie avec un frottoir garni de velours ou de peau de chamois. Le succès dépend surtout de cette première opération.

2° La plaque est fixée dans un cadre en bois et exposée horizontalement dans une boîte, aux vapeurs qui se dégagent spontanément de l'iode. Il se forme de l'iodure d'argent, et quand la surface argentine a pris une couleur jaune d'or, l'opération est terminée. Il faut, pour cela, de 5 à 15 minutes, suivant la température. On opère dans l'obscurité et l'on vérifie l'état de la surface à la faveur d'un peu de jour pénétrant par une porte entr'ouverte.

3° La plaque, soigneusement abritée par un écran qui ferme le cadre qui la contient, est ensuite portée dans la chambre noire, à l'endroit où se forme l'image focale qu'il s'agit de reproduire. La lumière agit en chaque point de la couche d'iodure d'argent, avec d'autant plus d'intensité qu'elle est plus vive. Au bout de quelques minutes, plus ou moins, suivant l'éclat de la lumière, on retire la plaque, sur laquelle on ne distingue encore rien[1].

[1] L'image peut paraître spontanément sur la plaque, mais il faut pour cela une exposition d'au moins une heure. De plus, cette image est *négative*, c'est-à-dire que les parties claires sont à la place des ombres, et réciproquement.

4° La plaque est alors exposée, sous une inclinaison de 45°, à la vapeur du mercure, dans une boîte dont le fond en tôle porte une cavité formant capsule et contenant du mercure. On chauffe la capsule en dessous, jusqu'à 60° environ, ce que l'on reconnaît au moyen d'un petit thermomètre dont la tige sort de la boîte. L'image apparaît alors, et l'on peut en suivre le développement, en éclairant la plaque par une bougie, à travers un verre rouge adapté à la boîte. Au bout de 4 à 5 minutes, on retire la plaque, sur laquelle le mercure s'est déposé en gouttelettes visibles seulement au microscope. Ces gouttelettes sont d'autant plus rapprochées que l'iodure d'argent a été plus fortement impressionné; de sorte que les parties de l'image qui étaient vivement éclairées sont d'une blancheur mate plus ou moins prononcée, et les endroits qui étaient peu éclairés, présentent la surface nue et miroitante de l'argent. — Pour expliquer ce résultat, remarquons que l'iodure d'argent est décomposé par la lumière, et qu'il se forme un sous-iodure, ou même de l'argent réduit en poudre impalpable, qui condense les vapeurs de mercure en quantité d'autant plus grande que les parcelles de métal sont plus abondantes. Le mercure ne se dépose pas sur les parties où l'argent est recouvert d'une couche d'iodure non décomposé.

5° Il reste à enlever l'iodure qui n'a pas été altéré, afin que la lumière ne puisse plus agir sur l'épreuve. Pour cela, on plonge la plaque au fond d'un vase plat rempli d'une solution aqueuse d'hyposulfite de soude contenant environ $\frac{1}{10}$ de sel en poids, et l'on fait osciller le vase de manière à faire passer plusieurs fois le liquide sur la plaque. L'iodure non décomposé est dissous, l'argent reprend sa couleur ordinaire dans les parties que le mercure n'a pas recouvertes, et on lave alors à l'eau pure.

6° Les clairs étant formés par des gouttelettes de mercure, le moindre frottement suffit pour effacer l'image. Pour lui donner plus de solidité, M. Dumas a imaginé, dès le principe, de verser sur la plaque une solution bouillante de dextrine, dont il reste une couche mince qui préserve l'épreuve. Parmi les diverses méthodes publiées depuis, nous citerons celle de M. Fizeau : on verse sur la plaque rendue bien horizontale au moyen de vis calantes, une couche d'une solution de chlorure d'or mêlée d'hyposulfite de soude, et l'on chauffe avec une lampe à alcool; l'air adhérent à la plaque se dégage et il se dépose une couche d'or, qui recouvre l'argent et les gouttelettes de mercure, en formant une sorte de vernis qui rehausse le ton de l'épreuve et lui permet de résister à un frottement modéré.

2071. Substances accélératrices. — Les admirables épreuves obtenues par Daguerre exigeaient 15 minutes environ d'exposition dans la chambre noire, ce qui rendait impossible l'application au portrait. En effet, il était difficile de compter sur l'immobilité du modèle pendant un temps aussi long; on était forcé de lui faire tenir les yeux fermés, et comme on l'exposait au soleil pour donner plus d'éclat à l'image, la gêne déterminait des contractions du visage qui en altéraient l'aspect habituel. Aussi n'obtenait-on que des



épreuves très défectueuses. Depuis, on est parvenu à réduire la durée de l'exposition à quelques secondes, et même à des fractions de seconde; d'abord par l'emploi d'objectifs perfectionnés (2072), mais surtout par l'augmentation de sensibilité de la couche impressionnable.

M. Claudet, en 1841, a exalté singulièrement cette sensibilité, au moyen de la vapeur de brome. Après avoir formé la couche jaune d'or d'iodure, on expose la plaque à la vapeur de brome dégagée spontanément du bromure de chaux, jusqu'à ce qu'elle ait pris une teinte rose, ce qui demande environ 30s ; puis on l'expose de nouveau à l'action de l'iode, jusqu'à ce qu'elle ait pris une teinte violacée. Il s'est formé un bromo-iodure d'argent que la lumière modifie bien plus rapidement que l'iodure. Il y a beaucoup de substances qui jouent, comme le brome, le rôle de *substances accélératrices*: le chlore, l'acide chloreux, le chlorure de brome, le bromoforme, le chlorure de soufre, etc.

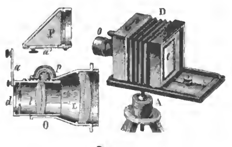


Fig. 1566.

2072. Du daguerréotype. — La chambre noire dont on fait usage dans la photographie, a reçu le nom de *daguerréotype* (*fig.* 1566). L'image se forme sur la paroi verticale opposée à l'objectif. Cette paroi peut être éloignée plus ou moins de l'objectif, au moyen d'un tirage à coulisse ou à soufflet D. L'appareil se place sur une petite table, articulée sur un support à trois pieds A, de manière qu'on peut l'incliner plus ou moins.

Objectif. — L'objectif des premiers daguerréotypes était formé d'une seule lentille, et il fallait en cacher les bords pour éviter l'aberration de sphéricité ; l'image étant alors peu éclatante, il fallait beaucoup de temps pour agir sur la plaque. M. Ch. Chevalier, en formant l'objectif avec deux lentilles, a pu lui donner une grande ouverture, tout en conservant l'image très nette (1993), et il a pu réduire ainsi la durée de l'exposition à deux ou trois minutes, avant l'invention des substances accélératrices. On voit en O (*fig.* 1566) la coupe d'un de ces *objectifs doubles* ; il se compose de deux lentilles achromatiques L, *l*, pouvant se rapprocher plus ou moins l'une de l'autre, au moyen d'un pignon *p* et d'une crémaillère, afin de mettre au point, et de faire varier le grossissement. On commence par mettre au point sur une lame de verre dépolie du côté intérieur *e*, que l'on observe en s'enveloppant d'un drap noir. On couvre l'objectif avec le disque *a*, on remplace la lame de verre par la plaque sensible, on retire l'écran qui cache cette dernière, et l'on découvre l'objectif.

Les rayons chimiques étant parmi les plus réfrangibles, il peut arriver que le *foyer chimique* se fasse plus près que le foyer lumineux. Il faut donc, par

quelques essais, étudier préalablement l'objectif de son appareil. On construit, du reste, des objectifs dont les foyers chimique et lumineux coïncident.

L'image de la chambre noire est renversée. Quand on retourne la plaque pour la voir droite, la gauche des objets représentés se trouve à droite et réciproquement, comme lorsqu'on se regarde dans un miroir. On évite cet inconvénient en adaptant, en *d*, à l'objectif, un prisme rectangulaire vertical P, sur la face hypothénuse duquel se réfléchissent les rayons. Le disque destiné à couvrir l'objectif est alors en *a'*.

Daguerréotype panoramique. — Quand on veut prendre des vues d'une certaine étendue horizontale, les images sont confuses, aux extrémités de l'écran, qui sont plus éloignées que son milieu, du centre optique de l'objectif, et où il y a plus d'aberration de sphéricité, à cause de la plus grande distance à l'axe des lentilles. M. Martens a levé la difficulté par l'invention du *daguerréotype panoramique*. Le fond de la caisse est cylindrique et reçoit la plaque, que l'on force, par des arrêts, à en prendre la courbure. L'objectif peut tourner autour de l'axe de la surface cylindrique, de manière que son axe optique vienne en rencontrer successivement les différents points. Une boîte, munie d'une fente verticale, et qui se meut avec l'objectif, limite latéralement les images. On fait passer ainsi successivement les différentes parties du paysage sur les différents points de la plaque, qui s'impressionnent les uns après les autres. Comme l'objectif tourne autour de l'axe de la surface cylindrique, les images des différents points de l'horizon apparaissent successivement, sans changer de place pendant le mouvement.

2073. Photographie sur papier. — La perfection et la finesse de détails des épreuves daguerriennes n'empêcha pas de désirer, dès le principe, qu'on pût opérer sur des lames moins pesantes et moins embarrassantes à manier que les plaques de métal, et ne présentant pas le miroitement désagréable qu'on leur reproche. Or, le problème était résolu en Angleterre par M. Talbot avant la publication de la méthode de Daguerre; mais, ayant voulu perfectionner son procédé avant de le faire connaître, il fut devancé par les inventeurs français. Les premiers essais de M. Talbot, qui ignorait heureusement les tentatives infructueuses de Wedgwood et de Davy, sont antérieurs à 1834, et avant 1839 il était en possession de sa méthode. Non seulement il fixait sur le papier les images de la chambre noire, mais encore il pouvait, avec une première épreuve, en obtenir un grand nombre d'autres sans recourir de nouveau au modèle, de même que l'on tire une multitude d'exemplaires, d'une planche gravée. Mais quand il fit connaître ce procédé, quelque temps après la publication du daguerréotype, la complication des manipulations, l'incertitude de la réussite, qui était telle qu'on manquait souvent neuf épreuves sur dix, l'infériorité des spécimens qu'il présentait, découragèrent les expérimentateurs. Cependant M. Bayard obtenait de très bons résultats par un procédé qu'il n'a pas publié. Quelques années plus tard, en 1847, un amateur de Lille, M. Blanquart-Evrard, fit connaître les simplifications et les perfectionnements

importants par lesquels il donnait à la méthode de M. Talbot la sûreté et les qualités pratiques qui lui manquaient [1]. Le principal perfectionnement consiste à plonger le papier dans les liquides dont on fait usage, de manière à obtenir une imbibition profonde, au lieu d'étendre simplement ces liquides au pinceau, comme le faisait M. Talbot. Voici comment on procède :

1° Préparation du papier sensible. — On choisit un papier mince, homogéne, bien uni et bien collé, et on le pose sur une dissolution d'azotate d'argent (4^{gr} de sel, 96^{gr} d'eau distillée), de manière à ne pas intercepter de bulles d'air et à ne pas mouiller la surface supérieure du papier. Au bout de 2 à 3 minutes, on enléve la feuille avec des pinces en platine ou à bouts de verre, et on l'étend, dans l'obscurité, sur une glace, le côté mouillé en dessous. Quand le papier est sec, on le rend sensible, en le plongeant entiérement dans une solution d'iodure et de bromure de potassium (6 d'iodure, 3 de bromure, 100 d'eau) ; il se forme de l'iodure et du bromure d'argent, et, au bout de 2 ou 3 minutes, on retire la feuille et on la fait sécher dans l'obscurité en la suspendant verticalement. Une fois sec, le papier peut être conservé pendant un mois et plus, dans l'obscurité.

M. Humbert de Molard a imaginé un papier sensible qui n'exige que de 3^s à 30^s d'exposition dans la chambre noire. Le papier est d'abord étendu pendant 5^m sur une solution d'iodhydrate d'ammoniaque (4^{gr} de sel pour 100 d'eau), et on le laisse sécher ; il ne se conserve que peu de temps. Au moment de s'en servir, on le plonge dans une solution de 7 à 8^{gr} d'azotate d'argent, 3^{gr} d'acétate de zinc et 3^{gr} d'acide acétique dans 100^{gr} d'eau.

2° Formation de l'épreuve négative. — Le papier, préparé par M. B. Evrard, peut être exposé sec dans la chambre noire ; mais il faut alors beaucoup de temps pour obtenir une bonne épreuve. Quand on veut opérer rapidement, par exemple, pour le portrait, il faut employer la feuille humide. On commence par étendre sur une glace rendue bien horizontale par des vis calantes, une couche d'une solution de 7^{gr} d'azotate d'argent et 15^{gr} d'acide acétique cristallisé dans 78^{gr} d'eau distillée, et l'on applique sur cette couche, le côté préparé de la feuille ; on expulse le liquide en passant le bord d'une lame de verre sur le papier, de manière à l'appliquer exactement sur la glace, on superpose une feuille de papier buvard mouillée, sur laquelle on place une seconde glace, et l'on expose dans la chambre noire la feuille ainsi disposée. Il faut l'y laisser à peu près le double du temps nécessaire à une plaque daguerrienne. La glace antérieure affaiblissant la lumiére, beaucoup de photographes l'enlèvent.

Quand on retire la feuille, de la chambre noire, l'image est invisible ; pour la faire apparaître, on applique le côté impressionné, sur une couche d'une solution saturée d'*acide gallique*, ou mieux d'*acide pyrogallique*, comme l'a imaginé M. Regnault. L'acide organique continue rapidement la réduction des sels d'argent, et d'autant plus que la lumière les a plus vivement impressionnés.

[1] *Annales de chimie et de physique*, t. XX, p. 100, et t. XXI, p. 147.

Les parties claires de l'image de la chambre noire sont donc sombres sur l'épreuve, et les parties ombrées sont claires, et l'on a ce que l'on nomme une *epreuve négative*. Cette épreuve est plongée pendant 20 à 25^{m} dans un bain d'hyposulfite de soude ou de bromure de potassium, qui rend l'épreuve inaltérable à la lumière en dissolvant les sels d'argent non décomposés. On lave à l'eau et l'on fait sécher.

Un papier qu'il faut tremper au moment de s'en servir, est fort incommode dans les voyages. D'un autre côté, le papier sec est trop long à s'impressionner. On obtient un papier sec trés sensible, de la maniére suivante : on plonge la feuille, pendant 2 ou 3^{m}, dans une solution de 5 pour cent d'iodure de potassium dans un demi-litre de sérum de lait, filtré, battu avec un blanc d'œuf, puis filtré de nouveau. Le papier étant sec, on peut le conserver indéfiniment dans l'obscurité. Quand on veut s'en servir, on le passe à l'acéto-nitrate d'argent, comme il est dit plus haut; seulement, au lieu de l'employer humide, on le laisse sécher. On peut donc en préparer un certain nombre de feuilles à l'avance, au moment de partir pour prendre des vues.

3° **Epreuves positives.** — L'épreuve négative ou *cliché* sert à obtenir des *épreuves positives*, c'est-à-dire dans lesquelles les ombres et les clairs occupent les mêmes positions que dans le modéle. On commence par rendre le cliché transparent en le plongeant dans de la cire vierge en fusion, puis le pressant entre des feuilles de papier buvard, avec un cylindre de fer-blanc plein d'eau bouillante, ou simplement un fer à repasser, jusqu'à ce que le papier buvard n'enlève plus de cire. On applique ensuite l'épreuve négative sur une feuille de papier sensible préparée comme celle qui a servi à la former; seulement, le papier n'a pas besoin d'être choisi avec autant de soin; on maintient les deux feuilles entre deux glaces, et l'on expose le tout au soleil ou à la lumière diffuse, l'épreuve négative en dessus. Les parties noires interceptant la lumière, la feuille inférieure se noircit sous les blancs, et reçoit un dessin où les ombres sont à la place des clairs de l'épreuve négative et réciproquement. Il faut beaucoup de temps pour obtenir ainsi une épreuve. Mais M. Blanquard-Evrard a réduit ce temps à moins d'une minute, par l'emploi de l'acide gallique, avec lequel on fait apparaître l'image, d'abord invisible, comme pour l'épreuve négative. On peut obtenir ainsi 300 à 400 épreuves positives par jour. On peut opérer pendant la nuit, au moyen de la *lampe photo-électrique* (2000).

Le lavage à l'hyposulfite de soude, qui termine toujours l'opération, permet de donner à l'épreuve une teinte générale, ou ton, que l'on peut varier à l'infini : quelques cristaux d'azotate d'argent, d'acide acétique, quelques gouttes d'ammoniaque, ajoutés au bain, donnent à l'épreuve des tons jaune, rougeâtre, que l'on fait encore varier en employant le liquide plus ou moins étendu d'eau, préparé plus ou moins anciennement, etc.

2074. Papier ciré ou gélatiné. — Le papier, à cause de sa texture fibreuse, ne se prête pas, comme les plaques métalliques, à la reproduction des plus fins détails; les contours de l'image sont moins nets et comme un peu

estompés. On a fait beaucoup de tentatives pour donner au papier une surface suffisamment lisse pour reproduire les plus petits détails. M. Le Gray et M. Fabre de Romans ont imaginé d'employer le papier imbibé de cire, par le moyen qu'on emploie pour cirer l'épreuve négative (2073). On le rend sensible par le procédé de M. B. Evrard ; seulement il faut le plonger totalement dans les bains, la cire rendant l'imbibition difficile, et prendre garde de ne pas briser ce papier, qui est assez fragile. — Le premier bain dans lequel on plonge la feuille peut être remplacé par un liquide contenant 10^{gr} d'iodure de potassium et 1^{gr} de bromure de potassium, dissous dans 100^{gr} d'eau mêlée à 100^{gr} d'albumine. Les épreuves sont alors d'une finesse de détails remarquable. Mais ce liquide ne peut se conserver que cinq ou six mois, et l'exposition à la chambre noire doit être plus longue qu'avec la première dissolution.

Papier gélatiné. — La cire empêchant les liquides d'imbiber le papier, M. Baldus l'a remplacée par la gélatine. On dissout au bain-marie 10^{gr} de gélatine blanche dans 500^{gr} d'eau ; on ajoute 5^{gr} d'iodure de potassium, plus 25^{gr} d'une dissolution d'acéto-nitrate d'argent (nitrate 6, acide acétique 12, eau 100). On pose la feuille de papier sur ce bain chaud, puis on la fait sécher. Quand elle est bien sèche, on la trempe dans de l'eau contenant $\frac{1}{100}$ d'iodure de potassium, ou, pour le portrait, $\frac{1}{1000}$ d'iodhydrate et $\frac{1}{1000}$ de bromhydrate d'ammoniaque. Ce papier étant sec, quand on veut s'en servir, on le pose sur une couche d'acéto-nitrate, et on l'expose humide à la chambre noire. On termine en passant à l'acide gallique, lavant à l'hyposulfite de soude, et cirant l'épreuve négative ainsi obtenue.

2075. Photographie sur verre albuminé. — Ce procédé, imaginé, en 1847, par M. Niepce de Saint-Victor, neveu du premier inventeur de la photographie, donne des épreuves d'une finesse qui le cède à peine à celle de la photographie sur métal. On étend sur une plaque de verre d'une propreté irréprochable, un liquide formé d'albumine obtenue en battant des blancs d'œufs, filtrant, ajoutant 1 pour cent d'iodure de potassium et 25 pour cent d'eau. On fait tourner la plaque sur elle-même, en la tenant par une poignée en gutta-percha, collée au centre sur la face opposée ; le liquide s'étend alors régulièrement. On fait sécher la plaque dans une position horizontale, en la renfermant, bien à l'abri de la poussière, dans une boîte contenant du chlorure de calcium, pour dessécher l'air. La plaque, une fois sèche (ce qui demande environ 24 heures), est trempée dans un bain d'azotate d'argent (8 d'azotate, 8 d'acide acétique cristallisé, 100 d'eau). La couche sensible, d'azotate d'argent, est alors prête à recevoir l'action de la lumière. On peut la faire sécher, et la conserver dans l'obscurité pendant plusieurs jours. Après 15 à 30^{m} d'exposition dans la chambre noire, on retire la plaque, et l'on fait apparaître l'image au moyen de l'acide pyrogallique ; puis on la fixe avec l'hyposulfite de soude. Cette image négative sert ensuite à obtenir des images positives sur une surface sensible quelconque. Il ne faut que 10^{s} au soleil, pour obtenir une bonne épreuve positive sur verre albuminé.

2076. Photographie sur collodion. — En 1851, M. Archer a découvert, en Angleterre, un procédé tellement rapide, que l'on peut, en découvrant l'objectif de la chambre noire et le recouvrant aussi rapidement que possible, reproduire l'expression la plus fugitive de la physionomie, prendre le dessin des corps en mouvement, comme les vagues de la mer, un cheval au galop, une locomotive lancée à grande vitesse, etc. Le *collodion* obtenu par M. Maynard, de Boston, en dissolvant le *pyroxyle* ou *fulmi-coton* dans l'éther sulfurique, est le véhicule de la couche sensible. Voici comment on opère : on dissout 1gr de pyroxyle dans 90gr d'éther et 60gr d'alcool à 33°, et l'on y mêle de l'iodure de potassium. Mais, pour avoir un effet instantané dans la chambre noire, il faut ajouter au collodion, sur 100gr, 15gr d'une solution alcoolique d'iodure d'argent et 6gr d'une solution alcoolique d'iodure de fer. Le liquide s'étend sur une plaque de verre de la même manière que l'albumine, seulement il est inutile de faire tourner la plaque. Il reste un voile de pyroxyle. Avant qu'il ne soit sec, on le plonge rapidement dans une solution de 4gr d'azotate d'argent dans 60gr d'eau ; la couche prend une apparence laiteuse par la formation de l'iodure d'argent. Cette dernière opération, qui rend la surface sensible, doit se faire dans l'obscurité. On expose ensuite à la chambre noire, et l'on passe à l'acide pyrogallique, puis à l'hyposulfite de soude. Quand on veut tirer des épreuves positives avec l'épreuve négative au collodion, il faut avoir soin de recouvrir celle-ci d'un vernis qui la préserve du frottement de la surface sensible sur laquelle on doit l'appliquer.

La couche au collodion donne des images aussi fines que l'albumine sur verre, et même les demi-teintes y sont plus fidèlement ménagées. Elle est particulièrement propre à la reproduction des paysages ; le feuillage vert ne renvoyant, comme le rouge, que des rayons chimiques très faibles. Malheureusement ce procédé exige de l'habileté et un assez lourd bagage. Néanmoins, les nombreux avantages qu'il présente l'ont fait rapidement adopter.

Nous venons de passer en revue les principales méthodes photographiques, celles qui servent de types, et autour desquelles viennent s'en grouper plusieurs autres, qui n'en diffèrent le plus souvent que par quelques modifications dans la manière d'opérer et dans la préparation des bains. Nous n'avons pas dû entrer ici dans les détails des manipulations, de la manière de préparer et de conserver les dissolutions ; nous n'avons pas parlé des caractères d'une bonne couche sensible, des inconvénients d'une trop courte ou d'une trop longue exposition à la chambre noire, etc. Il faut consulter à ce sujet les traités spéciaux de photographie ; notre tâche se réduisant à faire connaître les principes scientifiques de la photographie. — Dans ces dernières années, on a beaucoup perfectionné les méthodes et les appareils ; on opère sur papier de porcelaine, toile cirée, porcelaine, émail ; on obtient *directement* des épreuves positives soit sur verre, soit sur papier ; on fait des portraits de quelques millimètres de grandeur, qui, vus à la loupe ne perdent rien de la finesse des détails. On obtient des portraits de grandeur naturelle au moyen de la *chambre solaire*, sorte de

mégascope dans lequel on place la petite épreuve négative; elle est éclairée par derrière, au moyen des rayons solaires réfléchis par un miroir plan et rendus convergents par une lentille; un objectif donne ensuite l'image amplifiée du négatif, sur une feuille de papier sensible. Une des chambres solaires les mieux entendues est celle de M. Woodward.

2077. De la reproduction des couleurs sur une couche sensible. — La méthode daguerrienne avait à peine été divulguée, que l'on cherchait déjà le moyen de fixer les couleurs des images de la chambre noire. Mais le succès n'est pas encore venu complètement couronner les essais faits dans cette direction; car ces couleurs, que l'on voit souvent sur les épreuves photographiques, sont ajoutées après coup au pinceau. Cependant on a obtenu des résultats trop remarquables, au moins au point de vue scientifique, pour que nous négligions d'en faire mention.

Il fallait d'abord trouver une seule et même substance capable de recevoir l'empreinte colorée de toutes les espèces de rayons. Or, M. E. Becquerel est parvenu à fixer le spectre avec toutes ses couleurs, sur une même couche sensible. Antérieurement, M. Seebeck et M. Herschel avaient vu le chlorure d'argent prendre quelques nuances analogues à celles de la région du spectre qui l'éclairait, et M. Hunt, en 1840, avait vu la même substance, exposée au soleil sous des verres colorés, prendre des nuances rappelant celles de ces verres.

Image photo-chromatique du spectre solaire. — Voici comment M. E. Becquerel prépare sa couche sensible[1] : une lame de plaqué d'argent est suspendue dans une dissolution formée de $\frac{1}{4}$ de litre d'acide chlorhydrique ordinaire, dans 1 litre d'eau distillée. On fait communiquer la plaque avec le pôle positif d'une pile de deux couples de Bunsen faiblement chargés, et le liquide avec le pôle négatif, par une lame de platine parallèle à la plaque. Le chlore se porte sur la lame, et forme une couche de chlorure dont la nuance varie avec l'épaisseur. On arrête l'opération quand la couleur, qu'on observe à la faveur d'une faible lumière, paraît pour la seconde fois d'un violet-rose. La plaque étant alors exposée à l'action d'un spectre vif obtenu avec le secours d'une lentille, on voit les couleurs apparaître, en commençant par l'orangé et le rouge. Si l'on s'en tient à une impression légère, les nuances sont pures, mais faibles. Si l'on attend davantage, elles se prononcent, mais en même temps s'assombrissent. Le bleu, l'indigo et le violet sont celles qui présentent le plus d'éclat.

Si l'on recuit la plaque dans l'obscurité, pendant quelques minutes, à une température de 80 à 100°, elle prend une couleur de bois; et, quand elle est refroidie, le spectre s'y imprime avec des nuances vives et claires. De plus, la lumière blanche s'imprime en blanc, tandis qu'elle produit du noir sur la plaque non recuite. Au-delà du rouge, la plaque prend une couleur puce et finit par noircir, et elle s'impressionne en gris au-delà du violet. On empêche le dernier

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 3e sér., t. XXII, p. 451; t. XXV, 447; et t. XXXII, 192.

effet au moyen d'un écran de sulfate de quinine (2087). — Les couleurs les moins réfrangibles sont les moins belles. Pour augmenter leur éclat, on forme une couche de chlorure plus épaisse, et on l'expose pendant une ou deux heures à l'action des rayons rouges extrêmes, obtenus en superposant un verre bleu foncé de cobalt et un verre rouge foncé coloré par le protoxyde de cuivre; on recuit ensuite la plaque à 80°.

Si l'on opère avec un spectre étalé, on peut imprimer les principales raies ; mais il faut une heure ou deux d'exposition, pour avoir un bon résultat.

1078. Reproduction des estampes coloriées. — M. E. Becquerel ayant appliqué une estampe enluminée, sur la couche sensible, et ayant exposé le tout au soleil, le dessin s'imprima avec ses couleurs. Un écran de sulfate de quinine arrêtait les rayons plus réfrangibles que le violet, qui auraient donné une teinte grise générale. Les images de la chambre noire se reproduisent aussi avec leurs couleurs, mais il faut 10 à 12 heures d'exposition, et, de plus, le vert est peu distinct. Il est vrai qu'on peut obtenir une couche plus sensible en plongeant simplement la plaque pendant un instant dans une solution de bichlorure de cuivre ; mais les nuances n'approchent pas de celles que l'on obtient sur la couche préparée au moyen de la pile.

M. Niepce de Saint-Victor est parvenu, de son côté, à reproduire des estampes enluminées. Il a reconnu d'abord que la couche de chlorure, formée par l'immersion d'une plaque argentée dans une solution de chlore, tend à prendre plus facilement, sous l'influence de la lumière, une certaine teinte qui dépend de l'état de la dissolution. Quand elle est très faible, le jaune tend à se développer ; et, si la quantité de chlore augmente graduellement, les nuances les plus faciles à obtenir sont vert-bleu, indigo, violet, et enfin orangé et rouge quand il y a concentration. Les dissolutions de chlorure de cuivre et de chlorure de fer, donnent des couches sensibles plus favorables que le chlore seul. C'est avec de semblables dissolutions que M. Niepce de Saint-Victor a pu reproduire des estampes, avec leurs couleurs.

Un des résultats les plus remarquables obtenus par M. Niepce de St-Victor, au milieu de ses nombreuses recherches, est le suivant [1] : si l'on plonge une plaque dans une solution de chlore contenant un peu de chlorure d'un métal capable de donner une couleur à la flamme de l'alcool, la couche sensible reproduira cette couleur avec le plus de facilité. Par exemple, si la solution contient un peu de chlorure de strontium, qui colore la flamme en pourpre, la couche sensible exposée au soleil, après avoir été recouverte d'une estampe enluminée, reproduira les teintes rouges avec une grande intensité, tandis que les autres couleurs n'apparaîtront que faiblement.

Les images photo-chromatiques n'ont pas encore pu être fixées. Toutes les dissolutions que l'on a essayées font disparaître les couleurs, et ne laissent que l'image en noir. Le problème de la photographie chromatique n'est donc pas

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXII, p. 373.

encore résolu ; mais les remarquables résultats déjà obtenus permettent d'espérer que l'on parviendra un jour à une solution complète.

2079. Application de la photographie. — Indépendamment des services journaliers que rend la photographie aux voyageurs et aux archéologues, en leur permettant de reproduire avec rapidité et avec une fidélité irréprochables les sites, les monuments, les sculptures, les inscriptions les plus compliquées; les troupes françaises sont munies d'appareils photographiques qu'elles emportent dans leurs expéditions, de manière à pouvoir prendre le dessin de tout ce qu'elles rencontrent de remarquable dans les pays qu'elles traversent. La photographie rend encore de nombreux services aux beaux-arts, en permettant la reproduction rapide et très économique de tableaux, statues, bas-reliefs, gravures, dont on peut multiplier les exemplaires au moyen d'une seule épreuve négative. Les sciences physiques tirent aussi un parti des plus avantageux de la photographie ; nous avons vu les applications qu'on en fait à l'enregistrement des observations météorologiques (I, 390) et magnétiques (III, 1248). On conserve les images d'infusoires, de parties très petites de plantes ou d'animaux, grossies par le microscope solaire ou photo-électrique ; l'image se forme au fond d'une chambre noire à soufflet de 2^m environ de longueur, adaptée à l'objectif du microscope. On reproduit les pièces anatomiques, les objets d'histoire naturelle ; on copie les appareils, les machines les plus compliquées. Plusieurs photographes, entr'autres M. A. Martin et M. Crookes, ont trouvé le moyen de fixer l'image de la chambre noire sur le buis à graver [1]. M. Crookes étend simplement sur la surface du bloc, une couche imperceptible d'oxalate d'argent, et pose dessus l'épreuve négative du dessin à reproduire. Le dessin positif obtenu peut se conserver aussi longtemps que l'on veut dans l'obscurité. A la lumière diffuse, il noircit peu à peu, mais assez lentement pour que le graveur ait le temps d'achever son œuvre, surtout s'il a soin de couvrir de papier noir les parties auxquelles il ne travaille pas. Cette application importante est désignée sous le nom de *xylophotographie*.

On a pu prendre l'image du soleil, de la lune, de constellations, conserver les dessins des différentes phases des éclipses, en faisant tomber sur la surface sensible, l'image qui se forme derrière l'oculaire d'une lunette astronomique bien achromatique. Quand la lumière est faible, comme celle des étoiles, il faut que la lunette soit montée parallactiquement, c'est-à-dire qu'elle soit menée par une horloge qui lui fait suivre l'astre dans son mouvement. Une espèce de chambre noire fixée à l'oculaire porte le papier sensible. Quand on veut prendre ainsi l'image de la lune et qu'on emploie le collodion sur verre, on peut se servir d'une lunette fixe, car l'opération ne dure que 20 à 30^s, temps pendant lequel l'astre ne se déplace pas sensiblement.

Photomètre chimique. — La photographie fournit encore à la *photométrie* le moyen de comparer les intensités de lumières qui ne brillent pas

[1] Cosmos, *Revue des progrès des sciences*, t. III, et t. XIV, p. 37.

simultanément, par le temps nécessaire pour impressionner au même degré une surface sensible. MM. Fizeau et Foucault concentrent les rayons lumineux de la source, au foyer d'une lentille, sur la surface sensible. Si I est l'intensité de la source, i l'intensité au foyer, d la distance focale et r le demi-diamètre de la lentille, on aura

$$i = \mathrm{I}r^2 : d^2 = \mathrm{I}\ \mathrm{tang}^2\alpha$$

2α étant l'ouverture de la lentille prise du foyer. Si une autre source, I', impressionne de la même manière et *dans le même temps* la même surface sensible, on aura $i = \mathrm{I}'\ \mathrm{tang}^2\alpha'$ et par conséquent $\mathrm{I}\ \mathrm{tang}^2\alpha = \mathrm{I}'\ \mathrm{tang}^2\alpha'$; d'où l'on tirera le rapport des intensités I et I' des deux sources.

Comme il est difficile de disposer de α de manière à obtenir le même effet chimique au bout du même temps, on suppose que les intensités focales sont en raison inverse des temps employés à produire le même effet. En modifiant l'intensité focale d'une lampe, au moyen d'écrans, MM. Fizeau et Foucault ont reconnu que cette supposition est vraie, pour des temps et des intensités dont le rapport ne dépasse pas celui de 10 à 1. MM. Fizeau et Foucault prenaient pour couche sensible l'iodure d'argent de Daguerre; ils obtenaient 5 ou 6 impressions, les unes à côté des autres, pendant des temps différents, et choisissaient pour terme de comparaison celle que la vapeur de mercure faisait à peine apparaître. Ils ont ainsi comparé les intensités des principales sources naturelles et artificielles. M. J. Herschel et M. E. Becquerel ont employé les surfaces sensibles, pour comparer les actions chimiques des rayons du soleil à différentes hauteurs au-dessus de l'horizon. — MM. Bunsen et Roscoe ont fait aussi beaucoup d'expériences photométriques, en se servant de l'action chimique des rayons sur le mélange de chlore et d'hydrogène.

Gravure héliographique. — Nous avons vu comment on est parvenu à tirer des épreuves à l'encre, de plaques daguerriennes, soit en déposant à leur surface une couche de cuivre par les procédés galvanoplastiques, soit en attaquant la plaque en la faisant servir d'électrode positif (III, 1586). L'art d'obtenir des planches gravées en faisant agir différents mordants sur une plaque enduite d'un vernis affecté par la lumière. constitue la *gravure héliographique*. Objet des premières recherches de Niepce, l'inventeur de la photographie, elle a été le but des travaux de MM. Fizeau, Beuvière, Talbot, Poitevin, Niepce de Saint-Victor[1]. Ce dernier obtient une gravure sur acier, en recouvrant la plaque d'un vernis formé de bitume de Judée (5gr), benzine (100gr), et cire jaune pure (1gr). Il rend ce vernis très impressionnable, en versant sur la plaque, de l'éther sulfurique contenant quelques gouttes d'essence de lavande. Quand la plaque est sèche, il applique sur sa surface le recto d'une épreuve *positive* sur verre ou sur papier. Quand la lumière a produit son effet, il passe la plaque à l'huile de naphte contenant $\frac{1}{3}$ de

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXXVI, p. 908.

benzine, il fait ensuite agir un mordant formé d'acide nitrique étendu et mêlé d'un peu d'alcool, ou bien il emploie une dissolution d'iode qui attaque l'acier, et il termine avec l'eau forte.

Hélioplastie. — M. Talbot avait reconnu que la gélatine additionnée d'un bichromate alcalin devient, sous l'influence de la lumière, imperméable à l'eau, et il avait tiré parti de cette propriété pour graver les planches d'acier. M. Poitevin a reconnu que cette gélatine a perdu aussi la propriété de se gonfler, d'environ 6 fois son volume, quand on la plonge dans l'eau froide; et il part de là pour obtenir les planches gravées d'un dessin donné[1]. La gélatine, dissoute au bain marie et additionnée de quelques gouttes de dissolution concentrée de bichromate de potasse, est coulée sur une plaque bien horizontale, et séchée dans l'obscurité. L'épaisseur doit être très faible; il suffit de 4 à 5 décigrammes de gélatine par décimètre carré. On applique la feuille dessinée, et l'on expose quelques minutes au soleil. On trempe aussitôt dans l'eau; les parties préservées de la lumière par les traits noirs du dessin se gonflent seules, et se produisent en relief. On moule par la galvano-plastie, et l'on a une planche de cuivre gravée en creux, dont on tire des épreuves comme d'une planche gravée en taille douce.

Pour obtenir des clichés typographiques, on coule une couche de gélatine pure, d'épaisseur correspondant à $0^{gr},8$ à 1^{gr} par décimètre carré; quand elle est sèche, on la trempe dans une dissolution concentrée de bichromate, et on laisse sécher dans l'obscurité. On applique une épreuve photographique *négative* dn dessin, et on expose au soleil pendant 20 à 30^{m}. L'eau fait ensuite gonfler la gélatine, excepté dans les points qu'a frappés la lumière, lesquels correspondent aux traits du dessin positif; de manière qu'en prenant le moule galvanoplastique, ces traits soient en relief. Il reste à creuser davantage à l'échoppe les creux de grande largeur, la faible épaisseur de la gélatine ne comportant pas un gonflement suffisant pour leur donner la profondeur convenable.

Photolitographie. — Parmi les procédés décrits dans le mémoire de M. Poitevin, nous citerons encore le suivant : on mouille la surface d'une pierre lithographique *grenée* très finement, d'une dissolution d'albumine additionnée de bichromate de potasse; on égalise et l'on assèche la couche, au moyen d'un tampon de vieux linge. On applique le cliché *négatif* sur la pierre, et l'on expose au soleil pendant 15 à 20^{m}. On laisse refroidir dans l'obscurité, l'on enlève le cliché, et le dessin apparaît en brun. On mouille et passe le rouleau recouvert d'une encre spéciale nommée *encre de report*; l'encre grasse n'adhère que sur les parties qui ont reçu l'action de la lumière, tandis que, dans les autres, l'albumine étant soluble, elle se mouille et repousse le corps gras. On tire ensuite des épreuves sur papier par les procédés ordinaires de la lithographie.

2080. Images de M. Moser. — Il nous reste à dire quelques mots, à cause de l'intérêt qu'elles ont excité, des images singulières observées par

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXII, p. 192.

M. Moser, de Kœnigsberg [1], quoiqu'il paraisse certain aujourd'hui qu'elles ne se rattachent nullement aux effets chimiques de la lumière. On avait remarqué depuis longtemps que, si l'on trace des caractères sur une glace polie et qu'on les efface complètement, ces caractères reparaissent quand on y projette l'humidité de l'haleine. M. Moser a constaté que ce phénomène se manifeste avec toutes les surfaces polies. On peut encore obtenir des dessins, en soufflant l'haleine sur la surface polie, à travers un écran découpé, enlevant l'écran et soufflant de nouveau quand la vapeur est dissipée; on reconnaît facilement le dessin des découpures. Une médaille posée pendant un certain temps sur une glace, y laisse souvent une empreinte distincte; si l'empreinte est invisible, on la fait apparaître par le souffle.

La vapeur d'iode et celle du mercure favorisent beaucoup l'apparition des images. Si l'on pose une médaille, métallique ou non, sur une plaque d'argent iodée, on en reconnaît souvent immédiatement la place; mais en exposant la plaque aux vapeurs de mercure, on peut distinguer les figures et les lettres. La lumière diffuse, ou les rayons directs du soleil, peuvent aussi rendre distincte l'image, d'abord invisible, sur la surface iodée. La vapeur de mercure fait naître celle d'une médaille qui a été posée sur une plaque d'argent neuve bien polie et *non iodée*.

Une plaque d'argent neuve et bien polie exposée au soleil pendant plusieurs jours, sous un écran noir découpé, puis exposée aux vapeurs de mercure, laisse voir le dessin des découpures. Une plaque de cuivre et une plaque de verre donnent le même résultat, quand on expose, après l'insolation, la première aux vapeurs d'iode, et la seconde au souffle de l'haleine. La lumière semble donc avoir modifié la surface partout où elle l'a frappée.

Le résultat le plus remarquable observé par M. Moser, c'est que deux corps placés très près l'un de l'autre dans l'obscurité la plus complète, impriment leur image l'un sur l'autre; les images paraissent quelquefois au bout de 10 minutes. C'est ainsi qu'on voit assez souvent les mots et les chiffres gravés dans la boîte des montres, se peindre renversés sur la cuvette qui recouvre les rouages. Le sculpteur Rauch a vu l'image d'une gravure, sur la glace qui l'avait recouverte pendant longtemps sans la toucher. Les encadreurs observent quelquefois de semblables effets.

M. Karsten a obtenu des images semblables à celles de M. Moser, au moyen de décharges électriques : une médaille étant appliquée sur une lame de verre posée sur une plaque de métal, on fait jaillir des étincelles sur la médaille; l'électricité passe à la plaque de métal en contournant la lame de verre, sur laquelle le souffle fait apparaître ensuite l'empreinte de la médaille. Si l'on superpose plusieurs lames de verre, chacune d'elles donne l'empreinte sur la face tournée vers la médaille, mais d'autant plus faible qu'elle en est plus

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XV, p. 119, 855, 1201.

éloignée. Les mêmes effets se produisent sur une lame de métal polie, séparée de la médaille par une lame de verre ou de mica.

Les expériences de M. Moser ont fortement excité l'attention; elles ont été répétées sous des formes variées par plusieurs physiciens, parmi lesquels nous citerons MM. Morren, Bertot, Knorr, Hunt, Masson, Karsten [1]. M. Moser semble attribuer les images formées dans l'obscurité, à des radiations obscures dont l'intensité diminuerait rapidement avec l'obliquité, de manière que les rayons sortant normalement auraient seuls une action sensible. — M. Knorr les attribue à des radiations calorifiques. Il fait aussi apparaître les images, d'abord invisibles, en chauffant les plaques; et propose d'appeler *thermographie*, l'art de produire des empreintes par ce procédé.

M. Fizeau [2] a trouvé la véritable explication des images de Moser : les surfaces les plus nettes sont recouvertes d'une couche imperceptible de substances de nature organique, qui se déposent pendant l'exposition à l'air. Cette couche dont l'épaisseur varie avec la configuration des creux et des reliefs d'une médaille, se transporte sur les surfaces très rapprochées, par volatilisation, ou peut-être en obéissant à une sorte d'attraction, de manière que les vapeurs qu'on y projette ensuite y adhèrent autrement que dans les autres points; par exemple, sur le verre, l'humidité se dépose en gouttelettes plus fines et moins étalées là où la matière grasse est plus abondante. En effet, si on lave une lame de verre avec de l'acide nitrique et de l'eau bouillante, une goutte d'eau s'y étale entièrement, tandis qu'au bout de quelque temps d'exposition à l'air, la goutte forme une masse convexe et circonscrite. M. Fizeau a reconnu que les images ne se produisent pas sur une lame de platine nettoyée au point d'enflammer le gaz hydrogène, et qu'une médaille agit d'autant plus lentement, qu'on lui a fait déjà produire un plus grand nombre d'images, ou qu'elle a été mieux nettoyée. Quand elle a été chauffée, elle ne produit plus d'empreinte, et il suffit de passer la main à sa surface pour lui rendre sa première propriété. Une lame de mica interposée entre la médaille et la plaque, empêche l'image de se produire. Les décharges électriques paraissent agir en favorisant le transport de la matière grasse, de la médaille à la lame juxta-posée; ou bien, suivant les cas, en débarrassant cette dernière, de la substance grasse. Il peut se faire aussi que l'électricité agisse en modifiant profondément l'état moléculaire de la surface; alors l'empreinte peut durer pendant des années.

II. Propriétés éclairantes et calorifiques.

2081. Propriétés éclairantes. — L'intensité de la lumière n'est pas la même dans tous les points du spectre solaire. Il suffit d'un simple coup d'œil

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XVI et XVII, *passim*.
[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XX, p. 896; et XVI, p. 397.

pour s'en assurer. M. Herschel a reconnu que le maximum de lumière a lieu dans les rayons jaunes et verts ; il procédait en cherchant à quelle distance maximum il pouvait lire une page imprimée, quand elle était éclairée successivement par les différentes parties du spectre. Le photomètre de Masson (1888) donnerait des résultats plus précis.

Fraunhofer a étudié la distribution de la lumière dans le spectre, par le moyen photométrique suivant : il vise, à travers le prisme de son appareil (2887), une fente traversée par les rayons solaires, et observe en particulier une des couleurs. Soit *o* (*fig.* 1444) l'oculaire de la lunette ; un tube, perpendiculaire à son axe et équilibré par un contre-poids P', porte une petite lampe L' l', représentée en perspective en L *l*, qui peut être déplacée le long du tube, au moyen d'une vis micrométrique *v*, *v'*. En *n* est un petit miroir plan incliné à 45° sur l'axe de la lunette, et dont le bord vertical passe par l'axe. Les rayons colorés du spectre arrivent à l'œil placé en *o*, suivant la direction *so*, en même temps que les rayons de la lampe réfléchis en *n*. On déplace la lampe jusqu'à ce que ses rayons et ceux du spectre paraissent de même intensité, et l'on admet qu'il en est ainsi, quand le bord intérieur du miroir ne se distingue plus, malgré la différence de couleur des rayons. Les intensités des divers rayons colorés sont alors entre elles comme les carrés des distances de la lampe au miroir *n*.

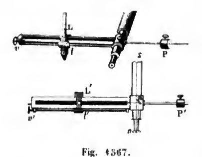


Fig. 1567.

Fraunhofer a trouvé ainsi que la partie la plus brillante du spectre est placée à la limite du jaune, entre les raies D et E. Les ordonnées de la courbe A L I, dans la figure 1565, représentent les intensités lumineuses correspondantes aux différentes raies, et la 2e colonne du tableau, page 201, contient les valeurs numériques de ces intensités, en prenant le maximum pour unité. La méthode de Fraunhofer n'est pas très précise ; car les résultats obtenus dans plusieurs expériences successives, diffèrent notablement.

2082. Propriétés calorifiques. — Nous avons vu (II, 739) que le spectre lumineux est accompagné d'un *spectre calorifique* qu'on a cru d'abord en être indépendant, mais nous avons vu aussi (II, 745) comment on a prouvé que, partout où il y a à la fois lumière et chaleur, ce sont les mêmes rayons qui produisent à la fois les deux sortes d'effets. Nous n'avons donc qu'à renvoyer à ce que nous avons dit à ce sujet.

III. Effets phosphorogéniques des rayons lumineux.

2083. Nous avons vu que la lumière a la propriété de rendre phosphorescentes certaines substances (1868). On s'est demandé si tous les rayons du spectre possèdent à cet égard la même efficacité. Quelques physiciens, et particulièrement Beccaria, avaient avancé que les rayons violets étaient les plus aptes, et les rayons rouges les moins aptes, à produire la phosphorescence. Des expériences faites avec la lumière électrique, par MM. Biot et Becquerel, semblèrent indiquer que les rayons *phosphorogéniques* étaient distincts des rayons lumineux ; mais il résulte d'expériences plus récentes de M. E. Becquerel, qu'il n'en est pas ainsi.

Ces expériences ont été faites avec les phosphores de Canton et de Bologne [1]. La matière était répandue pulvérisée, sur une feuille de papier enduite de gomme, tendue sur un cadre de bois. Quand la couche était sèche, on l'exposait dans la chambre noire à l'action d'un spectre pur ; on fermait les yeux, et, au bout de quelques minutes, on bouchait l'ouverture de la chambre, et l'on observait la phosphorescence. Quand il s'agissait du phosphore de Canton, la lueur avait lieu de la raie G à l'extrémité P (*fig.* 1565) ; il y avait une partie moins lumineuse en IN, et deux maximum, l'un entre H et G, l'autre en O. Le phosphore de Bologne donne des résultats semblables ; seulement il n'y a pas de minimum en IN, et il n'existe qu'un maximum, situé entre les raies I et M. On voit que les rayons phosphorogéniques se trouvent dans la même région du spectre que les rayons chimiques.

Les rayons *continuateurs* ont la faculté d'éteindre la phosphorescence quand elle existe d'avance ; ainsi, la substance phosphorique qui a été exposée à la lumière avant de recevoir l'action du spectre, cesse de luire dans l'espace HA, pendant que son éclat lumineux augmente de H en P. De plus, les parties soumises à l'action des rayons destructeurs de la phosphorescence perdent la propriété de luire sous l'influence de la chaleur. — M. E. Becquerel ayant fait tomber, sur la couche, pendant sa phosphorescence, les rayons solaires tamisés à travers un verre rouge, a vu ces rayons éteindre la phosphorescence, pendant qu'elle persistait dans quelques parties préservées de leur action par un écran ; ce qui confirme ce qui précède. Seebeck avait déjà remarqué cette propriété des rayons rouges.

Les rayons continuateurs n'éteignent pas immédiatement la phosphorescence ; au contraire, ils l'exaltent d'abord, comme le fait la chaleur, en faisant dégager rapidement la somme de lumière que la substance ne devrait émettre que lentement et pendant plus longtemps. On rend très sensible l'action des

[1] *Bibl. de Genève* (1842), t. XL, 357 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. IX, 314.

rayons rouges, en chauffant la substance ; la partie qui a été frappée par ces rayons reste obscure, tandis que tout autour, la surface devient lumineuse.

La couleur de la lumière phosphorescente, qui peut varier, de l'orangé-rouge au violet, n'a pas de rapport avec celle des rayons excitateurs, sauf pour trois substances : le *sulfure de barium*, qui répand une lueur jaune-orangé quand il a été frappé par les rayons situés entre H et P, et une lueur plus rougeâtre quand il reçoit les rayons violets et bleus ; le *sulfure de calcium*, lumineux rouge-orangé par les rayons compris de F en O, et qui présente une trace de nuance de vert, quand les rayons incidents sont compris entre O et P ; enfin la matière obtenue dans la réaction du sulfure de potassium sur les coquilles d'huître calcinées avec la chaux dans certaines circonstances, qui est lumineux violet-indigo dans la partie du spectre de même teinte, et devient bleu dans les rayons pris au-delà du violet. En général les rayons émis sont moins réfrangibles que les rayons excitateurs ; on voit que la substance qui précède présente une exception.

Lumière électrique. — Cette lumière très vive et riche en rayons très réfrangibles, produit la phosphorescence plus activement que les rayons solaires. La décharge est plus efficace que la lumière continue de l'arc voltaïque. L'expérience se fait dans des tubes horizontaux, dans lesquels on fait le vide, et qui contiennent une couche de la substance à étudier. On les fait traverser par la décharge d'une machine électrique, d'une batterie, ou de la bobine de Rumhkorff ; une seule décharge suffit, du reste, pour produire l'effet.

2084. Raies du spectre phosphorogénique. — Pour observer ces raies, il faut amplifier considérablement l'étendue du spectre. Pour cela, M. E. Becquerel reçoit les rayons dispersés sortant de la lentille, sur une seconde lentille de 10^{cm} de foyer seulement, placée à une distance plus petite que 10^{cm}, du foyer de la première, de sorte que les rayons colorés partant de ce dernier foyer, sortaient en divergeant de la seconde lentille ; et il explorait ainsi successivement les différentes parties du spectre, qu'il rendait environ dix fois plus étendues. On voit ainsi, sur la surface phosphorescente, des raies obscures qui occupent les mêmes positions que celles des spectres lumineux et chimiques. Pour rendre ces raies plus distinctes, on porte la température à 200 ou 300° ; les parties lumineuses augmentent d'éclat, et les raies ressortent davantage.

Au moyen des deux spectres parallèles, obtenus comme il a été dit plus haut (1923), on a reconnu que les lames incolores ou colorées, placées dans le passage des rayons incidents, absorbent les rayons phosphorogéniques dans les mêmes régions du spectre que les rayons lumineux et chimiques. On peut donc conclure de là, ainsi que de ce qui précède, et surtout de la coïncidence des raies, que les rayons phosphorogéniques ne sont pas plus distincts des rayons lumineux, que les rayons chimiques et les rayons calorifiques.

2085. Des substances phosphorescentes par insolation. — M. E. Becquerel a fait des recherches très étendues sur la phosphorescence par la

lumière. Tout ce qui suit est extrait des mémoires qu'il a publiés [1]. Il a reconnu d'abord que les substances qui deviennent lumineuses sous l'action des rayons solaires sont beaucoup plus nombreuses qu'on ne le croyait auparavant. 1° Il faut citer en première ligne les sulfures alcalino-terreux, comme ceux de baryum, calcium, strontium, connus sous le nom de *phosphores artificiels*. 2° Après ces corps, viennent quelques minéraux, certains diamants, des échantillons de fluorure de calcium, principalement la variété nommée *chlorophane*. 3° Un très grand nombre de minéraux et sels, le plus souvent à base alcaline ou terreuse, mais ne luisant que quelques secondes et rarement quelques minutes ; par exemple, l'aragonite, les calcaires concrétionnés, le chorure de baryum, les cristaux de sulfate et carbonate de strontiane ou de baryte, etc. Les carbonates de magnésie, de glucyne, les chlorures de potassium, de sodium desséché, etc.

Influence de l'état physique. — La phosphorescence paraît dépendre de l'état moléculaire des corps, en même temps que de leur nature. C'est ainsi que certains diamants sont phosphorescents par insolation, tandis que les autres variétés du carbone ne présentent rien de semblable. Les variétés de carbonate de chaux sont phosphorescentes à divers degrés, ou ne le sont pas du tout. L'azotate de chaux, les chlorures de calcium, de sodium, les sulfates de soude, de potasse, ne le sont plus quand ils sont dissous, le deviennent quand on les dessèche par un courant d'air chaud, et perdent en partie leur propriété quand on les fond, pour la reprendre au même degré en passant de nouveau par l'état de dissolution. La présence de l'eau de cristallisation peut aussi empêcher la phosphorescence. Les corps renfermés dans des tubes remplis de ivers gaz, ou dans lesquels on a fait le vide, conservent leur propriété de luire après avoir reçu l'action des rayons lumineux ; ce qui prouve qu'il n'y a pas d'action chimique.

La couleur de la lumière émise par une même substance varie aussi suivant la manière dont elle a été préparée. C'est surtout chez les sulfures que cela se remarque ; il faut généralement qu'ils soient préparés par la voie sèche et à une température élevée, mais pas trop élevée. La chaleur peut faire acquérir temporairement à quelques corps la propriété de luire avec toutes les couleurs, suivant la température ; et ils reviennent à la couleur primitive quand on les ramène à la température ambiante.

Durée de l'émission. — La durée de l'émission de la lumière phosphorescente n'est pas en rapport avec son intensité à chaque instant. Par exemple, le sulfure de strontium est encore lumineux après 30 heures, quoique, au premier moment, la lumière qu'il émet soit beaucoup plus faible que celle d'une foule d'autres substances qui cessent de luire après quelques minutes. Du reste,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LV, p. 5 ; LVII, p. 40 ; LXII, p. 5.

la durée dépend de la température, et diminue quand elle augmente, la même somme de lumière étant dépensée plus rapidement.

2086. Phosphoroscope. — Beaucoup de substances ne conservant la phosphorescence que pendant quelques secondes, M. E. Becquerel a pensé qu'il pouvait y en avoir qui ne luisent que pendant un temps trop court après l'action des rayons excitants, pour qu'on puisse constater leur phosphorescence, et il a imaginé des appareils qu'il nomme *phosphoroscopes*, destinés à les étudier. La figure 1568 représente le phosphoroscope *par réflexion*. AD est une boîte cylindrique à bases horizontales, dont une moitié se trouve dans la chambre noire et l'autre en dehors. Deux ouvertures *o*, *o'* sont pratiquées dans la base supérieure; l'une *o* laisse arriver les rayons solaires sur le corps *n*; l'autre *o'* permet de voir ce corps. Un écran circulaire *ee* placé sous la base supérieure AB,

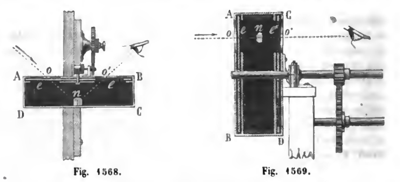


Fig. 1568. Fig. 1569.

reçoit un mouvement rapide de rotation; il porte trois ouvertures équidistantes, de manière que, si l'ouverture *o* est en face d'une de celle de l'écran, l'ouverture *o'* est fermée par cet écran, et *vice versâ*. Le corps reçoit donc les rayons solaires pendant un instant, et une fraction de seconde après, l'observateur voit la lueur que répand ce corps, s'il est phosphorescent. Cela se répète 3 fois à chaque tour, et, à cause de la persistance de l'impression dans l'œil, le corps présente une intensité lumineuse constante, et d'autant moins éloignée de sa valeur maximum, qu'il s'écoule moins de temps entre la fermeture de l'ouverture *o* et le dégagement de l'ouverture *o'* ; ce temps peut n'être que $\frac{1}{3000}$ de seconde.

Dans le phosphoroscope *par transmission*, les bases de la boîte cylindrique AD (*fig.* 1569) sont verticales et munies d'ouvertures *o*, *o'* placées en face l'une de l'autre. Deux écrans *e*, *e'* tournant sur le même arbre, portent 4 ouvertures placées, de manière que l'ouverture *o* soit fermée pendant que *o'* est ouverte, et *vice versâ*. Le corps se place en *n*, reçoit les rayons solaires et est aperçu par l'observateur, alternativement. Avec cette disposition, on peut faire tomber facilement sur le corps les rayons concentrés par une lentille, ou dispersés par un prisme, et étudier commodément les propriétés de la lumière phosphorescente émise par le corps *n*.

Voici quelques-uns des résultats obtenus par M. E. Becquerel, au moyen de ces appareils, dont il a beaucoup varié les dispositions : 1° Le phosphoroscope permet de constater la phosphorescence d'une foule de corps qui n'en donnent aucun signe quand on emploie les méthodes ordinaires ; par exemple le spath d'Islande, le marbre de Carrare, le flint, la porcelaine vernie, etc. Il y a des corps, particuliérement les métaux, qui ne paraissent pas phosphorescents, même avec le secours du phosphoroscope.

2° Les rayons émis par les corps phosphorescents, sont susceptibles d'exciter, quoique faiblement, la phosphorescence des sulfures alcalins, surtout quand les rayons sont violets ou bleus. Ils peuvent aussi produire des actions chimiques, et ce sont encore les rayons de la couleur la plus réfrangible qui agissent le plus promptement. On obtient sur une couche au collodion, l'image de l'ouverture o', au bout de $\frac{1}{2}$ heure ou $\frac{3}{4}$ d'heure, quand on place en n du sulfure bleu de strontium ou de calcium, ou de l'azotate d'urane.

3° L'intensité des rayons émis est proportionnelle à celle des rayons excitateurs, dont elle n'est que de 1 à 2 millioniémes au plus. — Il suffit, pour produire l'action, d'une fraction de seconde, d'autant plus grande que les rayons incidents sont plus faibles. La diminution d'intensité d'abord rapide, puis de plus en plus lente, se fait suivant une loi semblable à celle de Newton pour le refroidissement (II, 748). Il y a des corps (diamant, silicate de chaux, fluorure de calcium) qui changent 2 ou 3 fois de couleur pendant l'affaiblissement des rayons émis ; c'est que certains rayons s'affaiblissent plus rapidement que d'autres.

2087. Fluorescence. — Si l'on fait tomber sur certaines substances, les rayons invisibles du spectre situés au-delà du violet, ces substances répandent de la lumière, le plus souvent bleue, pendant l'action des rayons invisibles. Ce phénomène s'observe sur les dissolutions, dans l'eau ou l'alcool, de sulfate de quinine, d'esculine, de gaïac, de chlorophylle ; sur les teintures de curcuma, d'orseille, de tournesol ; sur des verres colorés ou incolores ; sur certains échantillons de spath-fluor, etc. On a donné le nom de *fluorescence* à ce phénomène, découvert, ou du moins bien défini par M. Stokes, qui en a fait une étude étendue et en a énoncé les résultats, en disant que les rayons plus réfrangibles que les violets, se transforment en rayons moins réfrangibles quand ils traversent certains corps, qui deviennent ainsi lumineux [1].

On observe la *fluorescence*, soit en faisant tomber le spectre sur les substances à étudier, soit en isolant par une fente certains rayons du spectre, et les concentrant sur la substance au moyen d'une lentille à court foyer. Par ce dernier moyen, M. Stokes a reconnu que la fluorescence peut être excitée par les rayons violets et bleus. Avec ces derniers rayons, la faible lumière émise par le *sulfate de quinine* est rouge. Si l'on rapproche la fente du violet, la lumière émise se mêle de jaune, puis de vert ; sous l'influence des rayons indigo, elle a une teinte verdâtre, et ne devient bleue que sous l'influence des rayons violets. La

[1] *Trans. phil.* pour 1852, p. 463 ; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e s., t. XXXVIII, p. 491.

lumière électrique, si intense et si riche en rayons très réfringents, produit fortement la fluorescence sur une foule de corps. M. Stokes a remarqué, dans la partie obscure du spectre rendue visible par projection sur le sulfate de quinine, des bandes sombres placées aux mêmes points que celles du spectre chimique. On peut observer ces raies, sur du papier lavé avec une solution de sulfate de quinine, de datura-stramonium ; avec la première, elles se détachent sur un fond bleu, et avec la seconde, sur un fond vert. Quand on a soin de cacher la partie la plus brillante du spectre, on voit sur le papier blanc un assez grand nombre de ces raies, dans une partie du spectre où l'observation par vision directe ne laisse distinguer aucune lumière.

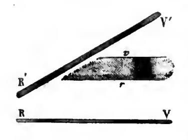


Fig. 1570.

M. Stokes observe encore la fluorescence par le moyen suivant : Il fait arriver la lumière par une fente *perpendiculaire* aux arêtes du prisme, et obtient ainsi un spectre impur, mais très étroit et très brillant, qu'il fait tomber sur la substance à étudier. Il observe ce spectre linéaire RV (*fig.* 1570) à travers un autre prisme parallèle à sa longueur, qui le relève obliquement en R'V' vers son sommet. En même temps, si la substance émet des rayons fluorescents, ces rayons, moins réfrangibles que les rayons venant des mêmes points du spectre linéaire RV, forment une sorte de spectre très large *rv*, présentant des bandes obscures *parallèles* au plan de réfraction, partout où il n'y a pas de rayons capables d'exciter la fluorescence. Cette méthode permet d'observer la fluorescence sur une foule de substances : le bois, la corne, les os, les coquilles blanches, le cuir, la peau de la main, les ongles, les feuilles. Les fleurs colorées, les métaux, le charbon, le soufre, le quartz, le spath d'Islande, le marbre blanc..., n'en donnent aucun signe.

M. Ed. Becquerel, qui avait vu, dès 1845, les rayons obscurs du spectre rendre lumineuses certaines substances, considère la fluorescence comme un effet de phosphorescence produite par les rayons plus réfrangibles que les violets, et durant trop peu de temps pour qu'on puisse l'observer après la suppression des rayons excitateurs, même en s'aidant du phosphoroscope. Les rayons émis par le corps fluorescent sont toujours moins réfrangibles que les rayons excitateurs ; comme cela a lieu pour la phosphorescence (2086), les raies sont placées aux mêmes endroits que dans le spectre chimique, et enfin quand un corps est à la fois phosphorescent et fluorescent sous l'influence des mêmes rayons excitateurs, il émet des rayons de même couleur.

On considère comme des effets de fluorescence, l'illumination des vapeurs très raréfiées contenues dans les tubes de Geissler (2043). On doit à M. Morren des études remarquables du spectre formé par des vapeurs fluorescentes portées à un degré de raréfaction inusité, par des moyens spéciaux.

Explication de quelques phénomènes. — Plusieurs minéralogistes, entr'autres Haüy, avaient remarqué que certains échantillons de spath-fluor éclairés par la lumière du jour, présentaient un reflet bleu. M. Brewster a étudié ce phénomène avec attention, et l'a observé sur des verres colorés et sur diverses infusions ; par exemple, celle des feuilles de laurier dans l'alcool [1]. M. J. Herschel a particulièrement étudié la dissolution incolore de sulfate de quinine; il a reconnu que la lumière blanche réfléchie ne vient que d'une trés petite profondeur, et il a donné au phénoméne le nom de *diffusion épipolique*. M. Stokes a fait une étude suivie de ces phénomènes et les a rapportés à l'action des rayons obscurs plus réfrangibles que les rayons violets, qui se trouvent mêlés à la lumière naturelle et excitent la *fluorescence*, nom qui rappelle que le phénoméne a d'abord été observé sur le *spath-fluor*.

M. J. Herschel a reconnu que les rayons qui excitent la fluorescence sont éteints en la produisant. Ce fait résulte de ce que la fluorescence par réflexion ne se produit que prés de la surface par laquelle pénétre la lumiére. En outre, on reconnaît que les rayons, qui ont traversé une solution de sulfate de quinine, ne peuvent plus exciter la fluorescence. Il y a ici quelque chose d'analogue à ce qui se passe avec les flammes qui absorbent les rayons de l'espéce de ceux qui forment les raies brillantes de leur spectre (2042) ; et l'on a l'explication de l'emploi des écrans en dissolution de sulfate de quinine, pour arrêter les rayons chimiques obscurs (2077).

M. Gladstone a fait une expérience curieuse qui montre que les rayons émis par fluorescence sont plus intenses que ceux qui sont envoyés diffusément par les surfaces non fluorescentes : il trace un dessin sur du papier ordinaire, avec une solution de sulfate de quinine ou de chlorophylle; les caractéres sont invisibles, et cependant ils se dessinent dans la chambre noire sur une couche sensible, au collodion; cette expérience est désignée sous le nom de *photographie de l'invisible*.

§ 5. — DE L'ACHROMATISME.

I. De la dispersion et du pouvoir dispersif.

2088. But de l'achromatisme. — Les lentilles et les prismes présentent l'inconvénient, trés grand pour les instruments d'optique, de disperser les rayons lumineux en les déviant. L'*achromatisme* a pour objet de détruire cette dispersion et la coloration qui en résulte, tout en conservant une certaine déviation aux rayons. Avant d'exposer les moyens par lesquels on obtient ce résultat important, nous allons établir quelques définitions.

2089. Dispersion et rapports de dispersion. — On reconnaît l'action plus ou moins grande d'une substance pour disperser la lumière, au moyen de

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. IX, p. 118.

la différence $n_v - n_r$ des indices de réfraction des rayons extrêmes du spectre. Cette différence a reçu le nom de *coefficient de dispersion* ou simplement *dispersion*. Depuis la découverte des raies de Fraunhofer, on prend pour n_v et n_r les indices correspondants aux raies H et B.

La *dispersion partielle* est la différence entre les indices de deux rayons autres que les rayons extrêmes du spectre : par exemple, la différence entre les indices des rayons rouges et jaunes, verts et bleus, etc. Ces indices sont toujours rapportés à la raie principale de chaque couleur. Les dispersions partielles de deux substances ne sont pas proportionnelles à leurs dispersions totales ; ce qui montre que les couleurs ne sont pas réparties de la même manière, dans les spectres que forment ces substances.

On nomme *rapport de dispersion* de deux substances, le rapport entre les coefficients de dispersion de ces deux substances $\frac{n_v - n_r}{n'_v - n'_r}$, ou entre les dispersions partielles correspondantes aux mêmes raies. Ce rapport change quand on passe de deux raies à deux autres.

Angle de dispersion. — On nomme ainsi l'angle dans lequel les différents rayons colorés sont étalés. Quand un rayon passe d'un milieu dans le vide en faisant un très petit angle i avec la normale, l'angle de dispersion est sensiblement égal à la *dispersion* multipliée par l'angle i. En effet, soient e_v et e_r les angles d'émergence des rayons extrêmes, on aura $\sin e_v = n_v \sin i$ et $\sin e_r = n_r \sin i$; d'où $\sin e_v - \sin e_r = (n_v - n_r) \sin i$; et comme i est très petit, prenant les angles pour les sinus, on a

$$e_v - e_r = (n_v - n_r)\, i,$$

formule dans laquelle $e_v - e_r$ n'est autre chose que l'angle des rayons extrêmes. On voit aussi que la *dispersion* $n_v - n_r$ est sensiblement égale au rapport entre l'angle d'écart des rayons extrêmes et l'angle d'incidence i.

2090. Pouvoir dispersif. — On nomme *pouvoir dispersif* d'une substance, le rapport entre la *dispersion* et l'indice de réfraction des rayons moyens diminué de 1. Si nous prenons pour rayons moyens les rayons jaunes, à la raie E, et si nous représentons par n_j leur indice de réfraction, le pouvoir dispersif sera $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$.

Pour nous rendre compte de ce que signifie ce rapport, considérons encore le cas d'un rayon passant dans le vide, en faisant un angle très petit i avec la normale, nous aurons $\sin e_j = n_j \sin i$, ou approximativement $e_j = i n_j$. Retranchant i des deux membres, il vient $e_j - i = i\,(n_j - 1)$. Le premier membre représente la déviation du rayon jaune ; donc, $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$, ou $\frac{e_v - e_r}{e_j - 1}$, n'est autre chose que le rapport de l'angle des rayons extrêmes, à la déviation du rayon moyen, ou de l'angle de dispersion à la réfraction moyenne. L'expérience

montre que, pour une même déviation des rayons moyens, l'angle des rayons extrêmes est différent dans deux substances différentes, ainsi que les angles d'écart entre deux couleurs quelconques. De plus, les différences entre les angles de deux rayons colorés, changent quand on passe de deux couleurs à deux autres.

2091. Mesure des coefficients de dispersion, des rapports de dispersion, etc. — Wollaston, un des premiers, s'est occupé de comparer les *dispersions* d'un grand nombre de substances solides et liquides[1]. Il procédait en observant la réflexion totale, dans l'expérience de Newton sur l'inégale *réflexibilité* des rayons (2027, 3°). Supposons que la face du prisme, sur laquelle doit se faire la réflexion totale, soit en contact avec de l'eau, et qu'on place l'œil de manière à recevoir les rayons réfléchis totalement à la surface de séparation du verre et du liquide, on verra le champ de réflexion bordé de franges colorées, le violet occupant le bord inférieur. Si les deux milieux, inégalement réfringents, dispersent également, les couleurs disparaîtront. On pourra donc, en remplaçant l'eau par des dissolutions salines, trouver le degré de concentration qui donne la même dispersion que celle du verre. — Quand le pouvoir dispersif du liquide est beaucoup plus grand que celui du prisme, il peut arriver que l'ordre des franges soit interverti, et que le rouge se trouve au bord inférieur. C'est ce qui a lieu pour un prisme de flint, avec l'huile de sassafras ; pour un prisme de spath pesant, de cristal de roche et surtout de spath fluor, avec une foule de liquides, ces solides ayant une faible dispersion. Il faut donner au prisme un angle tel que les rayons entrent et sortent à peu près perpendiculairement aux faces d'incidence et d'émergence, pour qu'il n'y ait de dispersion qu'à la surface de réflexion. — Les substances qui suivent sont placées dans l'ordre de leur dispersion, d'après Wollaston : 1, *soufre*; 2, *huile de sassafras*; 3, *flint*; 4, *huile de térébenthine*; 5, *spath d'Islande*; 6, *diamant*; 7, *crown*; 8, *eau*; 9, *acide sulfurique*; 10, *alcool*; 11, *spath pesant*; 12, *cristal de roche*; 13, *spath fluor*.

C'est dans le cours de son travail que Wollaston a découvert les premières raies du spectre. Fraunhofer, après les avoir découvertes de son côté, en a fait usage pour étudier les dispersions totales et partielles d'un certain nombre de corps solides et liquides. Il procédait en mesurant les indices de réfraction des principales raies, au moyen de son appareil (*fig.* 1525). Le tableau qui suit renferme une partie des résultats qu'il a publiés ; la dernière colonne contient les coefficients de dispersion :

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et Arts), t. XXVI, p. 231.

SUBSTANCES réfringentes.	B	C	D	E	F	G	H	COEFFICIENTS de dispersion. $n_H - n_B$.
Flint-glass, n° 13. . .	1,62775	1,62968	1,63503	1,64202	1,64826	1,66028	1,67106	0,04331
Crown-glass, n° 9. .	1,52583	1,52685	1,52958	1,53300	1,53605	1,54165	1,54656	0,02073
Eau.	1,33093	1,33171	1,33358	1,33585	1,33782	1,34129	1,34418	0,01325
Solution de potasse. .	1,39963	1,40051	1,40280	1,40563	1,40808	1,41258	1,41637	0,01674
Essence de térébenth.	1,47049	1,47153	1,47443	1,47835	1,48173	1,48820	1,49387	0,02338
Flint, n° 3.	1,80204	1,60380	1,60849	1,61453	1,62004	1,63077	1,64037	0,03833
Flint, n° 30.	1,62357	1,62547	1,63058	1,68735	1,64346	1,65540	1,66607	0,04250
Crown, n° 13.	1,52431	1,52530	1,52798	1,53137	1,53434	1,53991	1,54468	0,02037
Crown, lettre M. . . .	1,55477	1,55593	1,55907	1,56315	1,56674	1,57353	1,57947	0,02470
Flint, n° 23.	1,62659	1,62847	1,63367	1,64049	1,64675	1,65885	1,66968	0,1309

Rudberg a mesuré les indices de réfraction des raies de plusieurs cristaux, et M. Baden-Powel a fait le même travail par un grand nombre de liquides. M. Babinet a aussi indiqué un moyen de mesurer les dispersions de corps qu'on n'a qu'en petits fragments [1]. Après les avoir taillés en prisme dont on mesure l'angle, on regarde un spectre projeté sur un écran par un prisme connu, à travers le petit prisme à éprouver, placé de manière à recomposer les couleurs (1889), et l'on s'éloigne peu à peu du spectre jusqu'à ce qu'on ne distingue plus que de la lumière blanche. Si les prismes sont dans la position du minimum de déviation, et que leur angle soit assez petit, leurs dispersions seront en raison inverse de leurs distances à l'écran.

Depuis quelque temps on fabrique des verres très réfringents à acide borique et à bases métalliques nouvelles. Il était important d'en connaître les dispersinns. M. l'abbé Dutrou, au moyen de l'appareil cité plus haut (2008), a mesuré les indices des principales raies dans ces différents verres. Voici d'abord la liste de ces verres, par ordre de pouvoirs réfringents, avec leur densité :

		Densité.
1	Flint lourd jaune de Guinand à l'acide borique.	3,417
2	Flint de Fraunhofer.	2,135
3	Flint de Bontemps.	2,014
4	Flint ordinaire de Guinand. . .	3,610
5	Flint de Guinand à l'a. borique.	4,322
6	Autre, id.	3,559
7	Flint de Guinand, blanc.	2,622
8	Verre de Guinand, à l'a. borique	2,642
9	Autre, id.	2,613
10	Crown ordinaire de Guinand. .	2,184
11	Verre de Venise	2,743
12	Crown de Guinand à l'a. borique	2,362
13	Crown de Dollond.	2,484
14	Verre à l'acide borique de Maës et Clémandot	2,835
15	Crown de Bontemps	2,447
16	Verre de Maës et Clémandot à base de soude et zinc.	1,951
17	Autre, id.	1,523
18	Verre de Saint-Gobain	2,329

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXI, p. 513.

Dans le tableau qui suit sont réunis les rapports de *dispersions particlles* de quelques-uns de ces verres désignés par leurs numéros dans la liste ci-dessus. *b*, c, *d*..., *b'*, *c'*, *d'*... représentent, pour les deux substances comparées, les indices des raies que l'on désigne par les capitales des mêmes lettres. *b'*, *c'*, *d'*..., correspondent, en général, à des crowns.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES prises deux à deux.	$\frac{h-g}{h'-g'}$	$\frac{g-f}{g'-f'}$	$\frac{f-e}{f'-e'}$	$\frac{e-d}{e'-d'}$	$\frac{d-c}{d'-c'}$	$\frac{c-b}{c'-b'}$
Nº 1 el 16........	3,0110	2,8348	2,5817	2,5107	2,4657	1,9888
1 el 12........	2,2298	1,8779	1,9503	1,8292	1,8904	1,6228
3 el 15	1,9862	1,9278	1,9289	1,7964	1,8152	1,7913
4 et 11.	1,9389	1,8344	1,7750	1,6929	1,8043	1,4900
5 et 11........	1,9627	1,8251	1,7664	1,6890	1,7710	1,6250
6 et 10........	1,9606	1,8332	1,7089	1,8016	1,6457	1,5972
7 el 9........	1,8275	1,7581	1,7425	1,6828	1,2573	2,4294
6 el 2........	1,9049	1,8398	1,7994	1,7515	1,6946	1,5270
Nº 9 et 16........	1,1050	1,1253	1,0641	1,1399	1,1449	0,7352
15........	1,0187	1,0715	1,0550	1,1152	1,1128	0,8540
13........	1,0259	1,0406	1,0550	1,0662	1,0981	0,7610
12...... .	1,0337	1,0490	1,0401	1,0738	1,1214	0,7757
11........	1,0118	1,0154	1,0161	1,0286	1,1387	0,7610
10........	1,0559	0,0387	1,0030	1,0988	1,0665	0,7960
Nº 8 el 9........	0,9490	0,9811	1,0085	1,0231	0,9963	0,7894

Ce tableau montre que : 1º les rapports des dispersions partielles sont très différents quand on passe, dans les substances que l'on compare, de deux couleurs à deux autres; ce qui montre bien que les couleurs ne sont pas réparties de la même manière dans les différents spectres. — 2º Pour les flints (sauf le nº 9, qui réfracte moins que tous les autres) comparés aux divers crowns, le rapport des dispersions partielles va assez souvent en diminuant, du violet au rouge ; ce que l'on trouve également quand on calcule les rapports de dispersion au moyen des nombres donnés par Fraunhofer. — 3º Lorsque cela n'a pas lieu, le rapport $\frac{e-d}{e'-d'}$ est fréquemment plus grand, et quelquefois plus petit que celui qui le suit. Il en est de même, quoique moins souvent, du rapport $\frac{g-f}{g'-f'}$. — 4º Les rapports $\frac{h-g}{h'-g'}$ et $\frac{c-b}{c'-b'}$ sont presque constamment, l'un maximum, et l'autre minimum. — 5º Les rapports écrits

dans la même ligne horizontale diffèrent peu, pour le flint n° 9 comparé aux verres n°s 12, 13 et 15. Ils semblent donc mieux convenir que le flint et le crown ordinaire de Guinand, pour l'achromatisme, parce que si l'on ramène au parallélisme deux rayons colorés, les autres se trouveront aussi sensiblement parallèles.

Influence de la température. — MM. Dale et Gladstone, dans leurs recherches sur les indices de réfraction des liquides (2014), ont étudié les *coefficients de dispersion et les pouvoirs dispersifs* de ces liquides entre 0° et 60°. Ils ont reconnu, que le *coefficient de dispersion* diminue généralement quand la température augmente, et d'autant plus que le liquide disperse plus. Le *pouvoir dispersif* est tantôt augmenté, tantôt diminué par la chaleur, mais très peu. Voici quelques résultats relatifs au *sulfure de carbone* :

Température	0°	10°	20°	30°	40°
Coefficient de dispersion . .	0,0958	0,0937	0,0917	0,9901	0,0891
Pouvoir dispersif	0,1487	0,1477	0,1463	0,1457	0,1439

MM. Dale et Gladstone ont aussi mesuré la dispersion du phosphore, au moyen de phosphore coulé et solidifié dans un prisme de verre; ils ont trouvé 0,0238 pour le *coefficient de dispersion*, et 0,1781 pour le pouvoir dispersif, à 25°; nombres bien supérieurs à ceux du sulfure de carbone et des flints les plus dispersifs. Le coefficient diminue beaucoup, ainsi que l'indice de réfraction, quand le phosphore passe à l'état liquide ; mais le pouvoir dispersif diminue très peu ; il devient 0,1745, et le coefficient, 0,1878.

2092. Premières recherches sur l'achromatisme. — Newton, à la suite d'expériences faites avec des prismes de verre, d'eau et d'essence de térébenthine, avait admis que la dispersion était proportionnelle à la réfraction, de sorte qu'on ne pouvait recomposer la lumière blanche avec un second prisme, qu'en supprimant la déviation. Comme cette loi s'accordait avec l'explication qu'il donnait de la réfraction, dans son système de l'émission, Newton négligea de répéter ses expériences. Cependant, il résulte de la correspondance imprimée de ce grand physicien avec H. Oldemburgh, que ce dernier, en 1662, un siècle avant la réalisation de l'achromatisme, regardait comme possible de corriger les effets de la dispersion des lentilles, en interposant un liquide convenable entre deux ou plusieurs verres [1]. Euler, en 1754, considérant que l'œil est formé de plusieurs milieux, et que les objets s'y peignent sans couleurs, pensa qu'il était possible d'obtenir des lentilles achromatiques ; mais il supposa que la relation entre la dispersion et la réfraction était la même pour tous les milieux. Il trouva, par le calcul, une loi satisfaisant aux conditions cherchées, et prouva qu'elle était la seule qui pût y satisfaire. Les artistes s'empressèrent de faire des essais d'après les idées

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts), t. VII, p. 192.

d'Euler ; mais ils ne purent réussir. Cependant, un géomètre suédois, Klingenstriern, trouvait que les expériences de Newton conduisaient à un grand nombre de lois différentes et contradictoires, d'où il conclut que ces expérieuces ne pouvaient être exactes. Il communiqua son travail à Dollond, qui répéta alors les expériences de Newton avec un prisme de verre et un prisme d'eau à angle variable, et vit le rayon conserver une certaine déviation quand il avait ramené au parallélisme les rayons rouges et violets. Il construisit alors un système achromatique, en associant un prisme de flint et un prisme de crown. Il fabriqua ensuite des lentilles achromatiques qu'il appliqua à ses lunettes grossissantes, et pour lesquelles il prit une patente. Alors Hall vint réclamer la priorité ; il avait, en effet, fabriqué des lunettes achromatiques, mais il gardait son procédé secret. On rapporte que, pour éviter qu'on ne devinât l'usage qu'il faisait de ses lentilles, il en confiait le travail à deux opticiens logés en deux points opposés de Londres ; or, il arriva que ces deux opticiens faisaient tailler leurs verres par le même ouvrier, et Dollond ayant vu chez ce dernier des lentilles qui, réunies, ne donnaient pas de couleurs, fut mis sur la voie de sa découverte. Quoi qu'il en soit, le Parlement donna gain de cause à Dollond, qui avait divulgué la manière d'achromatiser les verres, et l'on s'accorde à lui attribuer l'honneur de l'invention. Les lunettes achromatiques de Dollond eurent un très grand succès, et une foule de géomètres s'empressèrent d'appliquer le calcul à la recherche des angles des prismes, ou des courbures des lentilles satisfaisant aux conditions de l'achromatisme, pendant que les expérimentateurs s'appliquaient à mesurer les constantes qui entrent dans les formules.

II. Des prismes achromatiques.

2093. Un système de prismes est *achromatique*, quand il dévie les rayons lumineux sans les colorer. La possibilité d'obtenir un semblable résultat ressort de ce qui précède. On a construit un petit appareil qui peut aussi la mettre en évidence : il consiste en trois prismes à angle assez petit A, B, C (*fig.* 1571) ; le prisme A est en crown, et les deux autres, dont les sommets sont tournés du côté opposé à celui du premier, sont en flint, et ils peuvent tourner autour du sommet du premier, au moyen d'une charnière. Si on les relève et si l'on fait passer les rayons solaires à travers le prisme A, ces rayons sont déviés et irisés. Si l'on applique le prisme B sur le prisme A, il y a coloration sans déviation ; et si l'on relève le prisme B et qu'on abaisse C, il y a déviation sans coloration.

2094. Conditions d'achromatisme d'un système de prismes. — Proposons-nous de trouver les angles que doivent avoir plusieurs prismes réunis, pour que le système dévie les rayons lumineux sans les colorer. Nous

supposerons que les angles des prismes sont très petits, et que les rayons les traversent à peu près perpendiculairement au plan bissecteur de cet angle ; alors la déviation de chaque prisme est donnée par la formule $d = (n-1)\,a$ (1971). Nous allons d'abord calculer les déviations totales produites par le système des prismes, sur les rayons de chaque couleur, et nous exprimerons ensuite que ces déviations sont égales.

Soient a, a', a''.... les angles des prismes ; n, n', n'' leurs indices de réfraction pour un rayon particulier du spectre ; et a, a', a''.... les angles de ces prismes. Les déviations produites par les prismes successifs seront $(n-1)\,a$, $(n'-1)\,a'$, $(n''-1)\,a''$.... ; et la déviation totale sera la somme

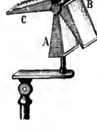


Fig. 1571.

$$[1] \quad D = (n-1)\,a + (n'-1)\,a' + (n''-1)\,a'' + \ldots.$$

Le premier terme étant positif, les autres le seront également pour les prismes dont l'angle sera tourné du même côté que celui du premier prisme, et ils seront négatifs pour les autres prismes. Pour d'autres rayons, dont les indices seraient n_1, n'_1, n''_1,..., n_2, n'_2, n''_2,..., on aurait de même les déviations totales.

$$[2] \quad D_1 = (n_1-1)\,a + (n'_1-1)\,a' + (n''_1-1)\,a'' + \ldots.$$

$$[3] \quad D_2 = (n_2-1)\,a + (n'_2-1)\,a' + (n''_2-1)\,a'' + \ldots.$$

. . . .

. . . .

Si l'on considère un nombre m de rayons, on aura ainsi les m déviations [1], [2], [3]...., [m] que leur fait subir le système des prismes. En égalant les $(m-1)$ dernières à la valeur de D, pour exprimer que les déviations sont égales, on obtiendra $m-1$ équations. — Si donc on forme un système de m prismes de nature différente, en se donnant l'angle du premier, on pourra calculer les angles que devront avoir les autres pour que le faisceau émergent soit cylindrique. — Il restera à voir si la déviation n'est pas annulée. — Si l'on employait moins de m prismes, il y aurait moins d'inconnues que d'équations ; certaines de ces équations seraient donc des équations de condition, et il pourrait arriver qu'on ne pût pas y satisfaire avec les valeurs données de n, n', n''... ; n_1, n'_1, n''_1.... ;.....

2095. Cas de deux prismes. — Dans la pratique, on ne rend parallèles que deux rayons colorés, au moyen de deux prismes. La dispersion étant très petite quand la déviation est faible, les autres rayons se trouvent alors sensiblement parallèles. On a, dans ce cas, les deux déviations

$$D = (n_r-1)\,a + (n'_r-1)\,a', \qquad D' = (n_v-1)\,a + (n'_v-1)\,a' ;$$

écrivant que ces déviations sont égales, il vient

$(n_r-1)\,a+(n'_r-1)\,a'=(n_v-1)\,a+(n'_v-1)\,a'$; d'où $\frac{a'}{a}=\frac{n_r-n_v}{n'_v-n'_r}$

L'angle a étant choisi arbitrairement, l'angle a' du second prisme sera connu. La valeur de a' est négative ; car, si n'_v est plus grand que n'_r, n_v est plus grand que n_r. Cela indique que le second prisme doit être renversé par rapport au premier.

Il faut aussi que la déviation $D=(n_r-1)\,a+(n'_r-1)\,a'$ ne soit pas nulle. Or, on peut écrire $\frac{D}{(n_r-1)\,a}=1+\frac{n'_r-1}{n_r-1}\,\frac{a'}{a}=1+\frac{n'_j-1}{n_j-1}\,\frac{a'}{a}$, parce que l'on a sensiblement $\frac{n'_r-1}{n_r-1}=\frac{n'_j-1}{n_j-1}$. Remplaçant $\frac{a'}{a}$ par sa valeur ci-dessus, et désignant par p et p' les pouvoirs dispersifs $\frac{n_v-n_r}{n_j-1}$ et $\frac{n'_v-n'_r}{n_j-1}$ des substances des deux prismes, il vient

$$D=a\,(n_r-1)\left(1-\frac{p}{p'}\right)$$

valeur qui ne peut être nulle, à moins que les pouvoirs dispersifs p et p' des deux prismes ne soient égaux, ce qui n'a pas lieu si on les choisit convenablement. On voit aussi que la déviation est d'autant plus prononcée, que p' est plus grand par rapport à p, et que n_r est aussi plus grand ; le milieu qui disperse le moins doit donc être le plus réfringent possible.

Le flint et le crown satisfont bien aux conditions de l'achromatisme de deux couleurs, qui sont ordinairement l'*orangé* et le *bleu* dans les raies D et G, comme étant les nuances les plus apparentes. Les autres couleurs se trouvent alors, par le fait, sensiblement achromatisées, quand les angles sont petits ; et comme elles sont peu éclatantes, leur présence est inaperçue. Par exemple, supposons un prisme en flint dont l'angle soit de 10° ; les indices des raies G et D, pour le premier flint du tableau de Fraunhofer (2091), et pour le crown de la seconde ligne, donnent $n'_v-n'_r=1{,}66028-1{,}63503=0{,}02525$; et $n_v-n_r=1{,}54165-1{,}52958=0{,}01207$;

d'où $a'=a\,.\,2{,}09=20°{,}9=20°54'$.

La valeur de la déviation est alors $D=19°12'$. — Si, au lieu de crown, on employait le cristal de roche, qui est plus réfringent et moins dispersif, la déviation serait plus grande, dans le rapport de 27 à 17 ; et si l'on employait le diamant, dans le rapport de 39 à 17.

2096. Spectre secondaire. — Quand les angles des prismes ne sont pas très petits, un de ces angles étant donné, on calcule l'autre approximativement par la méthode qui précède, et l'on achève par tâtonnement de lui donner la valeur convenable. Mais on ne peut alors détruire entièrement toutes les couleurs ; on distingue généralement le vert et le jaune. Les couleurs qui

restent ainsi forment ce qu'on appelle un *spectre secondaire*. Quand on achromatise trois rayons avec trois prismes, on a de même un *spectre tertiaire*. Dans ce dernier cas, on achromatise de préférence les rayons des raies C, F et G. Si l'on connaissait deux substances dont les rapports de dispersion fussent égaux dans toutes les parties du spectre, on aurait un achromatisme parfait en réunissant deux rayons seulement. Nous avons vu que cette condition est à peu près remplie par certains verres étudiés par M. Dutirou (2091); ils conviendraient donc mieux que le flint et le crown ordinaires.

2097. Méthodes pratiques. — Dans la pratique, on évite de faire les calculs qui précèdent, en faisant usage d'un prisme à angle variable en flint-glass, dont on modifie l'angle par tâtonnement, jusqu'à ce que l'on voie disparaître toute coloration, en regardant à travers ce prisme et celui que l'on veut achromatiser. On peut employer pour cela le prisme variable de Boscovich (1972); mais il est difficile de faire coïncider exactement les surfaces cylindriques en contact, et le frottement ne tarde pas à les dépolir.

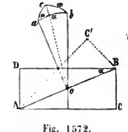


Fig. 1572.

Diasporamètre de Rochon. — On emploie de préférence, pour le même usage, le diasporamètre de L. Rochon ; voici quel en est le principe. Considérons deux prismes rectangulaires égaux ADB, ACB (*fig.* 1572); appuyés l'un sur l'autre par leur face hypothénuse, de manière que les faces BD et AC soient parallèles. Alors l'angle de ces faces est nul, et le système forme une plaque à faces parallèles. Si l'on fait tourner le prisme supérieur, de 180° autour de la perpendiculaire *oa* à la face AB, il prend la position AC'B, et le système forme un prisme C'AC dont l'angle est égal au double de l'angle α de chacun des prismes partiels. Entre ces deux positions, le système formera un prisme dont l'angle sera intermédiaire entre zéro et 2α.

On peut facilement calculer cet angle, pour une rotation connue du prisme supérieur. En effet, soit *ob* une perpendiculaire à DB, et *oc* la position qu'elle prend quand le prisme supérieur tourne autour de *ao*, d'une quantité angulaire ω. Si nous décrivons une sphère, du point *o* comme centre avec un rayon égal à l'unité, les trois plans *aob*, *aoc*, *cob* intercepteront sur sa surface un triangle sphérique *abc*, dans lequel l'angle *cab* n'est autre chose que l'angle de rotation ω, l'arc *ab* sert de mesure à l'angle α, et l'arc x mesure l'angle *cob* de la face AC avec la face DB dans sa nouvelle position ; ce triangle donne :

$$\cos x = \cos^2\alpha + \sin^2\alpha \cos \omega.$$

Après avoir trouvé par tâtonnement la position relative des deux prismes, pour laquelle le prisme donné est achromatisé, on tire de cette formule la valeur de l'angle x.

La figure 1573 représente le *diasporamètre*, en coupe et en perspective.

Les deux prismes égaux, représentés à part en AA′, sont fixés au fond de tubes r, t ; r', t'; dont un, r, r', est fixé à un disque vertical porté par le pied de l'appareil, et l'autre t, t', à un plateau a, a' garni de dents sur son contour, et pouvant recevoir un mouvement de rotation sur lui-même, au moyen du pignon, p, p'. L'angle de rotation se mesure au moyen d'un vernier et d'une graduation gravée sur le disque fixe. Quand le vernier est au zéro de la graduation, l'angle du système des prismes est nul.

La section droite du système des deux prismes changeant de position avec l'angle que forment leurs faces extérieures, il faut déplacer le prisme donné, de manière que sa section droite soit parallèle à celle du système. M. Dubosc

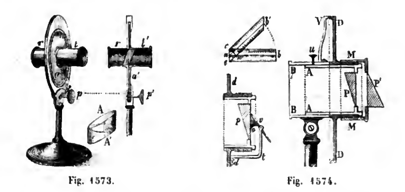


Fig. 1573. Fig. 1574.

a fait disparaître cet inconvénient, en fixant les deux tubes t', r' sur des plateaux mobiles garnis de dents latérales, que commande un même pignon vertical. De cette façon, les deux prismes tournent également, et la section droite du système reste constamment verticale.

Diasporamètre de M. Brewster. — Voici le principe de cet instrument, plus précis que le précédent. Si l'on regarde une ligne blanche sur un fond noir ab (*fig.* 1574) à travers un prisme parallèle à cette ligne, on voit une bande irisée ceb, de largeur $ce = l$. Si l'on incline la ligne dans la position ab', l'épanouissement ce dans le plan de réfraction restant le même, la largeur cn de la bande sera moindre et égale à $l \cos \alpha$, en appelant α l'angle $b'ab$. Si, au lieu d'incliner la ligne, on incline le prisme, le résultat sera le même, et la largeur de la bande sera proportionnelle au *cosinus* de l'angle qu'elle fait avec les arêtes du prisme ; elle sera nulle pour $\alpha = 90°$.

Cela posé, le prisme que l'on veut achromatiser est fixé en P (*fig.* 1574) dans un tube AA engagé dans un second tube BB fixé au pied de l'appareil. On fait tourner le tube AA, jusqu'à ce que les arêtes du prisme P soient parallèles à la mire linéaire, puis on serre la vis de pression u. Autour du tube AA tourne un manchon MM, portant un disque gradué DD, dont un vernier fixe V indique les déplacements angulaires. Au manchon se visse une

virole qui porte un prisme en flint P′, nommé *prisme-type*, et que l'on place d'abord parallélement à la mire, mais dans une position inverse de celle du prisme P. On fait ensuite tourner le prisme P′, de α, jusqu'à ce que la coloration de la mire disparaisse. Si a est l'angle du prisme P′, et l la dilatation qu'il fait subir à la mire quand il lui est paralléle, cette dilatation ne sera que $l \cos \alpha$ quand on l'aura fait tourner de α. Or, dans cette position, il dilate la mire comme le ferait un prisme de flint ayant pour angle $a \cos \alpha$, et qui serait parallèle à la mire ; $a \cos \alpha$ sera donc l'angle qu'il faudra donner à un prisme de flint, pour achromatiser le prisme donné P.

Cet appareil peut servir aux liquides : après avoir enlevé le prisme P′, on applique sur le prisme fixe, représenté à part en *p*, une lame de verre à faces parallèles, *v*, soutenue par un support *t* fixé au disque *dd′*, dont le zéro coïncide avec celui du vernier, quand le bord de la lame est parallèle aux arêtes du prisme P. On engage une goutte de liquide dans l'angle *o*, où elle adhère par capillarité ; et faisant tourner le disque *dd*, on cherche la position pour laquelle il y a achromatisme. Dans ce mouvement, la lame *v* fait toujours le même angle, connu d'avance, avec la face antérieure du prisme *p*.

Les diasporamètres ont servi à calculer des tables, donnant les angles que doivent avoir des primes de substance connue, pour s'achromatiser mutuellement. Comme les verriers fournissent aujourd'hui des verres de composition constante, les opticiens trouvent dans ces tables, des nombres qui les dispensent d'avoir recours à de nouvelles expériences.

III. Lentilles achromatiques.

2098. Un systéme de lentilles est achromatique quand il ne présente pas d'*aberration de réfrangibilité*, c'est-à-dire quand les rayons différemment réfrangibles émanant d'un point lumineux, vont se réunir en un même foyer conjugué (2028). Charles mettait en évidence l'existence de l'*aberration de réfrangibilité*, par l'expérience suivante. On découpe dans une carte, une fente circulaire limitant un petit disque soutenu par trois fils de fer, et ayant un diamètre égal à celui de l'image focale du soleil formée au foyer de la lentille. Quand on place la carte au foyer, le centre de l'ouverture annulaire sur l'axe de la lentille, on intercepte toute la lumière ; mais si l'on rapproche la carte de la lentille, un écran placé au-delà du foyer reçoit une auréole de lumière rouge, qui passe ensuite au jaune. Si on éloigne la carte, l'auréole est violette et bleue.

2099. Calcul des courbures d'un système de lentilles achromatiques. — Nous allons chercher les courbures qu'il faut donner à plusieurs lentilles appliquées les unes sur les autres, pour que le système réunisse tous les rayons colorés en un seul et même foyer. Nous supposerons que l'épaisseur du systéme est négligeable.

Soit *si* un rayon incident simple (*fig.* 1575), et F le foyer conjugué du point *s* quand il n'y a qu'une lentille, L ; on aura, en posant $si = p$, $iF = p'$,

$$[1] \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}$$

a étant la distance focale principale de la lentille pour l'espèce de rayon coloré considéré. Supposons une seconde lentille L', dont une des faces coïncide avec une de celles de la première. Le rayon *siab*, arrivé en *b*, prendra la direction *bc*F' ; et comme le rayon partant de F', sortirait de la lentille L' suivant *ba*, le point F, situé sur le prolongement de *ba*, est le foyer conjugué du point F' par rapport à la lentille L'. On a donc, en posant $F'c = p''$,

$$[2] \qquad \frac{1}{p''} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{a'}.$$ On aurait de même $$\frac{1}{p'''} - \frac{1}{p''} = \frac{1}{a''},$$

si l'on avait une troisième lentille L'' ; le rayon parvenu en *n* se déviant suivant *ne*F'', et le point F'' étant le foyer conjugué de F', par rapport à la

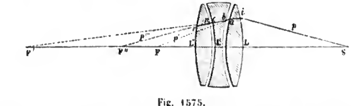


Fig. 1575.

lentille L''. Si l'on avait *m* lentilles, on aurait ainsi *m* équations, dont la m^e serait

$$\frac{1}{p_m} - \frac{1}{p_{m-1}} = \frac{1}{a_{m-1}}.$$

L'épaisseur du système étant supposée négligeable, p, p', p''..., p_m peuvent être regardés comme représentant les distances des points F, F', F''... au centre optique du système. En ajoutant ou retranchant ces égalités membre à membre, on élimine p', p''..., p_{m-1}, et il reste

$$\frac{1}{p} \pm \frac{1}{p_{m-1}} = \frac{1}{a} \pm \frac{1}{a'} \pm \frac{1}{a_{m-1}},$$

qui donne la valeur de p_{m-1}, ou la distance du foyer au centre optique du système, en fonction de p et a, a', a''... ; qui sont eux-mêmes fonction des rayons R, R' ; R', R'' ; R'', R'''... des lentilles, et de leurs indices de réfraction n, n', n''... pour le rayon coloré considéré, car on a

$$a = \frac{RR'}{(n-1)(R+R')},\ a' = \frac{R'R''}{(n'-1)(R'+R'')},\ a'' = \frac{R''R'''}{(n''-1)(R''+R''')},\dots$$

Si l'on considère de même une autre espèce de rayons simples, on aura une nouvelle équation qui donnera la distance du foyer formé, au centre optique, en fonction des rayons de courbure des lentilles et de leurs indices par rapport à cette nouvelle espèce de rayons. En considérant ainsi successivement m rayons, on aura m distances focales exprimées en fonction des $m+1$ rayons de courbure des m lentilles. Egalant une de ces distances aux $m-1$ autres, on obtiendra $m-1$ équations du premier degré, dans lesquelles il entrera $m+1$ rayons de courbure. Deux de ces rayons étant choisis arbitrairement, on calculera la valeur des autres, de manière à satisfaire aux équations, et l'on aura ainsi les courbures que devront avoir les faces de lentilles de substance donnée, pour que tous les rayons colorés fassent leur foyer au même point, c'est-à-dire pour qu'il y ait achromatisme.

2100. Cas de deux lentilles. — Dans le cas de deux lentilles, l'une convergente et l'autre divergente, on n'achromatise directement que deux sortes de rayons. Ajoutons les équations [1] et [2], nous aurons

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a}+\frac{1}{a'}; \qquad \text{et} \qquad \frac{1}{p}+\frac{1}{p''_1}=\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a'_1}$$

en ajoutant les deux équations analogues pour un autre rayon. Les valeurs de p'' et p''_1 seront égales, si l'on a

$$[3] \qquad \frac{1}{a}+\frac{1}{a'}=\frac{1}{a_1}+\frac{1}{a'_1}.$$

Or, en appelant R, R′ les rayons de courbure de la première lentille supposée *bi-convexe*, et — R′ et R″ ceux de la seconde, dont la face de rayon R′ est alors *concave* ; appelant enfin n_r, n'_r les indices des substances des lentilles par rapport au premier rayon, et n_v, n'_v leurs indices par rapport au second, nous aurons

$$a=\frac{RR'}{(n_r-1)(R+R')}, \qquad a'=\frac{R'R''}{(n'_r-1)(R'-R'')};$$

$$a_1=\frac{RR'}{(n_v-1)(R+R')}, \qquad a'_1=\frac{R'R''}{(n'_v-1)(R'-R'')}.$$

Substituant ces valeurs dans l'équation [3], on en tire

$$R''=\frac{RR'(n'_v-n'_r)}{R(n'_v-n'_r)-(R+R')(n_v-n_r)}; \text{ qui devient } R''=\frac{R(n'_v-n'_r)}{(n'_v-n'_r)-2(n_v-n_r)},$$

quand les deux faces de la lentille ont la même courbure. On prend arbitrairement les rayons de courbure R, R′ de la première lentille, et l'on donne au rayon de courbure de la face extérieure de la seconde, la valeur de R″. Cette face extérieure sera convexe ou concave, suivant que R″ sera positif ou négatif. La valeur de R″ étant indépendante de p, on voit que l'achromatisme existera, quelle que soit la position du point lumineux.

Dans la pratique, on emploie une lentille bi-convexe en crown, et un ménisque divergent en flint. On achromatise les rayons bleus et orangés ; les autres rayons se trouvent alors plus près du parallélisme que lorsqu'on achromatise les rouges et les violets. On complète ensuite l'achromatisme en modifiant par tâtonnement les courbures des deux lentilles. Pour qu'il fût parfait, il faudrait employer deux substances présentant les mêmes rapports de dispersions partielles dans toute l'étendue du spectre.

2101. Lentilles achromatiques à liquide. — La difficulté de trouver des substances solides remplissant la condition dont nous venons de parler a fait songer à employer des liquides. On doit à Blair un grand travail sur ce sujet [1]. Il formait un système achromatique, au moyen de deux lentilles de crown, l'une plan-convexe, l'autre concave-convexe, dont les faces convexes tournées l'une vers l'autre contenaient un liquide, retenu par une bande circulaire réunissant les bords des deux verres. Le liquide formait ainsi une lentille bi-concave. Aprés un grand nombre d'essais, Blair adopta, pour ce liquide, une dissolution de chlorure d'antimoine dans l'acide chlorhydrique. En faisant varier les proportions d'acide, on modifie beaucoup plus le pouvoir dispersif que le pouvoir réfringent, de manière qu'on peut, par tâtonnement, obtenir un achromatisme presque complet.

Fresnel et Barlow ont aussi étudié les lentilles achromatiques à liquide. Ce dernier plaçait à une certaine distance d'une lentille bi-convexe en verre, une lentille bi-concave en sulfure de carbone contenue entre deux verres de montre ; en l'éloignant plus ou moins, ils corrigeaient l'aberration de réfrangibilité et même l'aberration de sphéricité. Quand la chaleur altérait l'achromatisme, il suffisait de déplacer un peu la lentille, pour le rétablir.

On n'a pas tardé à renoncer aux lentilles à liquides, parce qu'il y a toujours perte de liquide par l'évaporation ; les variations de température détruisent l'homogénéité, et, dans le cas de liquides acides, les surfaces de verre sont bientôt dépolies par corrosion. Heureusement que certaines des nouvelles espèces de verre étudiées par M. Dutirou (2091) présentent toutes les conditions désirables pour donner un bon achromatisme.

§ 6. — PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES DÉPENDANT DE LA DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE.

I. Absorption et réflexion de la lumière par l'atmosphère.

2102. Absorption de la lumière par l'atmosphère. — L'air atmosphérique n'est pas parfaitement transparent ; il absorbe, quand il est en grande épaisseur, une partie sensible de la lumière qui le traverse. C'est pour cela que

[1] *Bibliothèque britannique* (Sciences et arts, 1798), t. VII, p. 177.

les montagnes, vues à une grande distance, paraissent comme dans un brouillard. Cependant leurs contours sont assez nets quand elles se projettent sur le ciel. Si, au contraire, on regarde, d'un sommet élevé, l'intérieur d'une vallée profonde, tout y paraît confus et comme enveloppé d'une fumée bleuâtre, parce que la lumière réfléchie par le fond des vallées est peu intense. L'affaiblissement de la lumière dans l'air est dû à plusieurs causes, parmi lesquelles il faut citer la présence des particules d'eau en suspension, et les différences de densité des couches, provenant soit des changements de pression, soit d'une distribution inégale de la température. Il se fait une réflexion en arrière, à chaque passage d'une densité à une autre, de manière que le rayon transmis est continuellement affaibli. Cela nous explique pourquoi les objets éloignés paraissent souvent enveloppés de brouillard quand le soleil frappe la plaine, et détruit l'homogénéité de l'air en déterminant des courants ascendants. C'est par un temps couvert, et surtout après la pluie, que l'air est le plus transparent, les parties d'inégale densité ayant été mélangées par la chute des gouttes d'eau, et leur température rendue plus uniforme par un refroidissement général.

On pourrait croire, d'après ce qui précède, que l'air n'a pas par lui-même de faculté absorbante, mais la coloration des rayons du soleil quand il est près de l'horizon, prouve qu'il y a une véritable absorption ; le disque solaire prend alors une teinte orangée, et son éclat est assez affaibli pour que l'œil puisse le supporter ; c'est que les rayons ont à traverser une bien plus grande épaisseur d'air, que près du zénith. Nous avons remarqué une semblable absorption des rayons calorifiques (II, 1095).

Les vapeurs atmosphériques, qui sont surtout abondantes dans les couches inférieures de l'atmosphère, contribuent évidemment à la coloration du soleil à l'horizon ; car, si la vapeur proprement dite ne décompose pas les rayons qui la traversent, les gouttelettes d'eau qu'elle forme en se condensant les colorent en rouge sombre, comme le ferait une lame de verre enfumé. C'est ce qui résulte des expériences de M. Forbes faites au moyen de vapeur renfermée dans des globes de verre dont il changeait la température de manière à obtenir un brouillard plus ou moins épais [1]. Cette propriété de la vapeur précipitée peut se constater aussi, quand ces nuages qui s'échappent des machines à vapeur à haute pression se projettent sur le soleil. Comme, dans nos climats, il se condense, le soir, beaucoup de vapeurs dans l'atmosphère, on voit pourquoi le soleil couchant est d'un rouge prononcé ; tandis que le soleil levant est jaune d'or, l'air du matin étant plus pur, parce que les vapeurs précipitées ont eu le temps de se déposer sur le sol. Comme le soleil et l'atmosphère à l'horizon occidental ou oriental sont toujours colorés en jaune plus ou moins prononcé, en toute saison et dans tous les climats, il faut bien admettre que l'air pur, à lui seul, est capable d'exercer une absorption différente sur les divers rayons

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. VII, p. 175.

simples. La lumière rouge qui colore la surface de la lune pendant les éclipses totales, provient des rayons solaires décomposés dans notre atmosphère et réfractés de manière à converger dans l'ombre terrestre. Dans tous les cas, les rayons les plus réfrangibles sont ceux qui sont le plus absorbés, comme l'a constaté Hassenfratz, en formant le spectre solaire à différentes heures du jour, ou en différentes saisons; il a toujours vu les rayons les plus réfrangibles s'affaiblir d'autant plus que le soleil était plus près de l'horizon. Nous avons vu que l'eau a aussi la propriété d'absorber ces sortes de rayons, tandis qu'elle réfléchit les rayons bleus (2056).

2103. Éclat de l'atmosphère par réflexion. — L'atmosphère a la propriété de réfléchir une partie de la lumière qui la traverse. Quand on se trouve sur une hauteur dominant une grande ville, on voit, pendant la nuit, une lueur plus ou moins élevée émanant de la réflexion sur l'air, de la lumière du système d'éclairage des rues. Cette réflexion de l'air concourt à empêcher les ombres portées pendant le jour d'être dans une obscurité complète. Cette lumière, répandue en tous sens par des réflexions multiples, donne au ciel un éclat qui empêche de distinguer les étoiles en plein jour; ce qui montre que cette lumière est au moins 64 fois plus vive que celle des étoiles les plus brillantes (1889). L'éclat de l'air est peu inférieur à celui de la lune, car cet astre se voit en plein jour comme un léger nuage blanc.

Circonstances qui font varier l'éclat de l'atmosphère. — L'éclat de l'atmosphère est variable; il dépend de la pureté de l'air, et augmente quand il y a des particules d'eau en suspension. Il dépend aussi de l'épaisseur de la couche d'air, et est moindre sur les montagnes que dans les plaines. Tous les voyageurs ont remarqué la teinte sombre du ciel sur les hautes montagnes; l'éclat de l'air y est tellement affaibli, que l'on peut, dit-on, y voir les étoiles en plein jour, en se plaçant à l'ombre. Cependant de Saussure n'a pu constater le fait; il le rapporte comme l'ayant entendu affirmer par les guides de Chamonnix. M. Boussingault n'a pas été plus heureux dans les Andes, quoiqu'il se soit trouvé plusieurs fois dans les conditions les plus favorables.

Lucimètre de Bouguer. — Pour un même état de l'atmosphère et une même position de l'observateur, la lumière réfléchie varie avec la distance du point considéré au soleil. Bouguer a comparé les degrés d'*illumination* des différents points de l'atmosphère sereine, au moyen de l'appareil de la figure 1576. *ac* et *bd* sont deux tubes de même section, fermés en *c* et *d* avec du papier huilé, et réunis par une charnière qui permet de les écarter l'un de l'autre comme les branches d'un compas. On dirige ces tubes sur les points du ciel que l'on veut comparer, et l'on allonge le tube *ac*, qui est composé de deux parties rentrant l'une dans l'autre, jusqu'à ce que les deux écrans c, *d* soient également éclairés. L'observateur a la tête enveloppée d'un drap noir qui entoure les extrémités *c*, *d* des deux tubes. Les diamètres angulaires des parties du ciel qui envoient de la lumière en chaque point des écrans, sont



évidemment en raison inverse des longueurs, *ac* et *bd*, et par conséquent ces parties du ciel sont en raison inverse des *carrés* de ces longueurs. Lors donc qu'il y aura égalité d'illumination en *c* et *d*, les intensités lumineuses des régions du ciel considérées, seront dans le rapport des carrés des longueurs *ac* et *bd*.

Au moyen de cet appareil, qu'il nomme *lucimètre*, Bouguer a reconnu que l'atmosphère a son plus grand éclat dans le voisinage du soleil, jusqu'à 3 ou 4°; au-delà, l'éclat diminue. Dans certaines expériences, où l'air était très pur et le soleil à 25° au-dessus de l'horizon, l'éclat de l'atmosphère s'est trouvé 4 fois plus faible environ à 31 ou 32° de l'astre qu'à 8° ou 9°. — Le soleil étant à 20° de l'horizon, les points du ciel situés à la même hauteur à droite et à gauche de l'astre, présentaient un éclat qui allait en diminuant jusqu'à 115° à peu près, puis augmentait jusqu'au point opposé au soleil; il y avait donc deux minimum et un maximum.

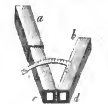


Fig. 1576.

Arago a trouvé, par une méthode que nous ferons connaître plus tard, que l'éclat de l'atmosphère est constant jusqu'à une distance angulaire du bord du soleil égale à son diamètre apparent, et que cet éclat est égal à 0,002 de celui du disque solaire.

2104. Couleur bleue de l'atmosphère. — En même temps que l'atmosphère réfléchit les rayons solaires, elle les décompose; de là, la couleur azurée qu'elle nous présente. Cette nuance est d'autant plus prononcée que l'air est plus pur. Quand les neiges des montagnes sont éclairées par les rayons solaires, elles paraissent blanches ou d'une teinte rose ou orangée, suivant la hauteur du soleil; tandis qu'elles présentent souvent une teinte bleuâtre du côté opposé à l'astre. M. Tyndall, qui a observé le lever du soleil, du haut du Mont-Blanc, a vu les flancs de la montagne d'un rouge vif du côté frappé directement par les rayons, et d'un bleu pur, du côté opposé. La couleur bleue est donc bien produite par des rayons réfléchis sur les molécules de l'air, et non par des rayons décomposés par transmission.

Cyanomètre. — La teinte bleue de l'atmosphère est variable. Pour l'apprécier, Saussure traçait sur une feuille de papier, un espace annulaire divisé en 53 compartiments contenant les *nuances* du bleu passant graduellement du blanc au noir. Il cherchait sur cet anneau, nommé *cyanomètre*, la nuance la plus rapprochée de celle du ciel au point observé. Voici comment Saussure obtenait des cyanomètres comparables entre eux, c'est-à-dire dont les compartiments de même rang avaient exactement la même nuance : il avait remarqué que deux nuances qui diffèrent peu, semblent identiques, quand on les regarde d'une certaine distance, qui varie avec l'intensité de la lumière incidente, et il prenait pour distance à laquelle la différence entre deux nuances consécutives devait disparaître, celle où il cessait de distinguer un point noir de 1 ligne $\frac{3}{4}$ de

diamètre, sur une feuille blanche éclairée par la même lumière[1]. — Nous décrirons plus tard d'autres *cyanomètres* plus précis, dont le principe dépend de la théorie de la lumière polarisée.

Au moyen des cyanomètres, on a constaté que la teinte bleue du ciel est plus prononcée au zénith qu'à l'horizon; qu'elle est plus foncée après la pluie, l'air étant plus pur, et d'autant plus pâle qu'il y a plus de gouttelettes en suspension dans l'air; c'est pourquoi la teinte est blanchâtre au-dessus de la mer, et que, sur les continents, un ciel pâle est un signe de pluie. La teinte d'un même point du ciel change pendant le jour; elle se fonce généralement du matin à midi, et pâlit ensuite de plus en plus. Quand le soleil est près de l'horizon, la couleur du ciel, produite par des rayons transmis, ne présente plus sensiblement de teinte bleue : par exemple, Saussure trouva un jour, près du zénith, la teinte du n° 23 de son cyanomètre, et celle du n° 4 près de l'horizon. D'après M. de Humboldt, le bleu du ciel est plus prononcé entre les tropiques, où l'air est plus pur, que dans les hautes latitudes.

Quand on s'élève sur les montagnes, la couleur du ciel se fonce de plus en plus; l'atmosphère renvoyant de moins en moins de lumière réfléchie à mesure que sa densité et son épaisseur diminuent. Ce fait, bien connu des pâtres des Alpes, a été observé par Deluc et par Saussure dans les Alpes, et par de Humboldt dans les Andes. Sur les sommets accessibles très élevés, le ciel paraît presque noir, et cependant la densité de l'air est encore plus de moitié de ce qu'elle est au niveau de la mer.

2105. Crépuscule. — Sans l'atmosphère, la nuit viendrait brusquement, dès que le soleil disparaîtrait sous l'horizon, et le jour commencerait de même subitement. On nomme *crépuscule du soir*, ou simplement *crépuscule*, la lumière que le soleil répand sur la terre quelque temps après son coucher, et *crépuscule du matin* ou *aurore*, celle qu'il répand avant son lever. On prend ordinairement pour limite du crépuscule astronomique le moment où les étoiles de 6e grandeur commencent à se distinguer le soir, au zénith, ou disparaissent le matin. Dans nos climats, le crépuscule du soir finit, moyennement, quand le soleil est à 17 à 18° au-dessous de l'horizon. L'aurore commence quand il est un peu moins bas, parce que les vapeurs atmosphériques, précipitées pendant la nuit, ne s'élèvent pas aussi haut. Du reste, ces évaluations sont très vagues, l'état de l'atmosphère ayant une grande influence sur la durée du phénomène; quand la couleur pâle du ciel atteste la présence de beaucoup de vapeurs condensées, le crépuscule est très long. C'est ce qui a lieu dans nos climats pendant l'hiver, et habituellement dans les régions polaires. Entre les tropiques, où l'air est généralement sec et pur, le crépuscule a une si faible durée, que plus d'un voyageur a été surpris par l'arrivée rapide de la nuit. Le crépuscule ne dure qu'un quart d'heure au Chili, et quelques minutes seulement à Cumana et sur

[1] *Journal de physique*. t. XXXVIII, p. 199.

la côte occidentale d'Afrique. Bruce a vu, dans le Sennaar, la nuit suivre presque immédiatement le coucher de soleil; mais aussi, l'air était tellement pur qu'il distinguait facilement la planète *Vénus*, en plein jour.

Courbe crépusculaire. — Quand le soleil s'approche de l'horizon, le ciel blanchit au zénith et jaunit à l'occident. En même temps, on voit vers l'orient une teinte purpurine, plus ou moins prononcée suivant l'état de l'air, produite par la réflexion des rayons solaires qui ont pris cette couleur en traversant horizontalement l'atmosphère, et la communiquent aux légers nuages ou aux sommets élevés qu'ils peuvent rencontrer. Quand le soleil est couché, on aperçoit à l'horizon oriental un segment bleu sombre, au-dessus duquel se trouve la teinte purpurine dont nous venons de parler. Ce segment est parfois bordé d'une bande blanche ou jaunâtre; son point culminant s'élève de plus en plus, à mesure que le soleil s'abaisse, et finit par gagner le zénith, puis l'horizon occidental, avec lequel la bande jaune se confond quand le crépuscule cesse. Le contour du segment, signalé par de Mairan, se nomme *courbe crépusculaire*; il est quelquefois nettement dessiné, comme Lacaille l'a vu dans son voyage au Cap. Le segment s'explique naturellement par l'ombre conique de la terre, qui empêche les rayons solaires d'éclairer les parties de l'atmosphère qui lui correspondent; ces parties ne réfléchissent que la faible lumière diffuse qui les frappe, en lui conservant la teinte bleue qui lui est propre. Quand la courbe crépusculaire est assez élevée, on aperçoit souvent une lueur sensible du côté de l'orient; c'est le *second crépuscule*; il est dû aux rayons réfléchis par les parties de l'atmosphère voisine de l'horizon occidental, ou même situées au-dessous de cet horizon.

2106. Couleurs de l'aurore. — C'est surtout avant le lever du soleil qu'on peut étudier les couleurs qui se succèdent à l'horizon occupé par le soleil, l'air étant plus pur le matin que le soir. M. Bravais a suivi la marche du phénomène, du sommet du Faulhorn, à 2683 mètres au-dessus de la mer [1]. Voici le résumé d'une trentaine d'observations faites par un ciel bien pur, et dans lesquelles la couleur du ciel a été relevée pour des positions du soleil variant de 2 en 2°, les distances angulaires étant corrigées des effets de la réfraction. Quand le soleil, avant de se lever, est à 102° du zénith, l'horizon paraît bordé d'une bande très mince rouge ou orangée, dont la courbe crépusculaire est distante de 7°; l'espace compris entre cette courbe et l'horizon est plus éclairé que le reste du ciel. La zone orangée s'étend ensuite, se borde de jaune, puis de vert, qui s'étend de plus en plus, pendant que la courbe crépusculaire marche vers le zénith. Quand elle a dépassé un peu ce point, auquel cas le soleil est à 94 ou 93° du zénith, il se forme, au-dessus du vert, une zone purpurine qui disparaît bientôt. Quand le soleil est arrivé à 92° du zénith, l'horizon oriental jaunit, le vert est plus marqué et s'étend depuis 3° jusqu'à 18°; l'arc crépusculaire se trouve alors à 3° de l'horizon occidental,

[1] *Cours de météorologie* de M. Kaemtz, traduit par M. Martins, p. 498.

et est entouré d'une zone purpurine, de 12° de largeur environ. Le soleil se levant ensuite, la courbe disparaît, et l'horizon occidental est bordé d'une bande rougeâtre, surmontée de jaune, que vient envelopper plus tard une légère teinte verdâtre. Le rouge disparaît à l'orient, et est remplacé par du jaune, surmonté par le vert, qui persiste encore quand le jaune a disparu, le soleil n'étant plus qu'à 88 à 86° du zénith.

L'explication de ces phénomènes compliqués n'est pas chose facile ; cependant on reconnaît que les zones rouge et jaune sont dues à l'absorption produite par l'air sous des épaisseurs différentes. Quant à la couleur verte, elle paraît due aux rayons jaunes réfléchis, mélangés avec des rayons bleus de lumière diffuse réfléchis dans certaines régions. Ajoutons, que M. Babinet voit dans ces phénomènes, des effets de *diffraction*.

2107. Rayons crépusculaires. — Quand les rayons solaires passent par les éclaircies de nuages épais, on peut en suivre la marche à travers l'atmosphère, au moyen de l'illumination qu'ils produisent dans les particules de brouillard suspendues dans l'air. On aperçoit des bandes plus claires que le fond sur lequel elles se projettent, et qui semblent diverger du centre du soleil. Mais ces bandes sont parallèles entre elles, et c'est par un effet de perspective qu'elles semblent diverger, les parties les plus éloignées paraissant le plus rapprochées. Si elles dépassent le zénith, elles paraissent converger vers le point de l'horizon opposé au soleil. Ces effets sont semblables à ceux que l'on observe quand on se trouve au milieu d'une allée d'arbres. Si le soleil vient de se coucher et qu'il se trouve ainsi entouré de nuages, souvent invisibles parce qu'ils sont au-dessous de l'horizon, on aperçoit de semblables bandes, colorées en pourpre ou en jaune, comme l'est l'atmosphère à l'occident, et paraissant diverger, du point où se trouve le soleil. Le nombre, la couleur, l'étendue de ces bandes sont variables, comme on pouvait le prévoir ; M. Necker de Saussure, qui en a fait une étude suivie, les nomme *rayons crépusculaires* [1].

2108. Hauteur de l'atmosphère déduite du crépuscule. — On peut calculer approximativement la hauteur de l'atmosphère, au moyen de la position de la courbe crépusculaire à un instant donné après le coucher du soleil, quand on suppose que cette courbe est limitée par des rayons qui n'ont subi qu'une seule réflexion. Soit m (*fig.* 1577) un point de la surface de la terre, mh son horizon, aca la limite de l'atmosphère. Menons dans un plan vertical passant par le point m et par le centre du soleil, une tangente, snc, de ce centre à la surface terrestre. Si nous négligeons la réfraction atmosphérique, le point c sera le point culminant de la courbe crépusculaire, et l'on pourra, quand les circonstances seront favorables, et que le contour de cette courbe sera bien marqué, mesurer la hauteur angulaire $\alpha = cmh$ du point culminant c. On peut aussi connaître l'angle ehs qui mesure l'abaissement du soleil au-dessous de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXX, p. 113 et 225.

l'horizon du point *m*, au moyen du temps *t* écoulé depuis son coucher; car on a $ehs : t = 360° : 24^h$. Le triangle *chm* donnera alors l'angle *mch*. On connaîtra donc, dans le quadrilatère *mcno*, trois angles, *mch*, $cno = 90°$, $cmo = 90° + \alpha$, et deux côtés *no* et *mo*, qui sont des rayons de la terre, et l'on pourra calculer la valeur de *cm*. Alors on connaîtra, dans le triangle *cmo*, deux côtés et l'angle compris $cmo = 90° + \alpha$, et l'on pourra calculer le côté *co*, d'où l'on déduira la hauteur $pc = co - po$. Cette méthode est due à Kepler, mais Alhazen, auquel on doit un traité du crépuscule, en avait déjà tiré parti pour établir une limite inférieure de la hauteur de l'atmosphère.

Si les rayons qui limitent la courbe crépusculaire arrivent en *m*, après n'avoir subi, comme nous l'avons supposé, qu'une seule réflexion, on devra, par ce moyen, trouver la même valeur pour la hauteur de l'atmosphère, quelle que soit l'heure de l'observation. Or, il n'en est pas ainsi; le résultat est d'autant plus grand que le soleil est plus bas au-dessous de l'horizon. Lambert, qui a aussi déduit la hauteur de l'atmosphère de l'observation du crépuscule, et renversé ainsi les idées exagérées qu'on se faisait de cette hauteur, remarque, dans sa *photométrie*, l'incertitude résultant du nombre de réflexions, et y soumet la question au calcul. Biot a repris ces calculs, en se servant des données de la science moderne et des observations faites au Cap par Lacaille, en 1751, dans des conditions où la courbe était d'une netteté remarquable, et il a trouvé ainsi pour la hauteur de l'atmosphère, en supposant successivement une, deux ou trois réflexions, les nombres de 58 916^m, 10 797^m et 6 392^m. Les deux derniers sont évidemment trop faibles, puisque Gay-Lussac s'est élevé à 700^m, et que là, la densité de l'air n'était réduite qu'à la moitié de sa valeur au niveau des mers. Biot admet alors que la véritable hauteur de l'atmosphère est comprise entre les deux plus fortes évaluations; de sorte que la courbe crépusculaire, quand on l'observe à l'horizon, appartiendrait au second espace crépusculaire. Lambert avait aussi adopté cette opinion, qu'il appuyait sur de nombreuses considérations, que Biot a reproduites en les rendant plus claires. La hauteur de l'atmosphère, d'après Lambert, serait de 29000^m, valeur qui semble bien probable. Les résultats déduits du crépuscule, qui comportent, comme nous le voyons, de nombreuses incertitudes, sont, en outre, probablement trop faibles, parce que les rayons réfléchis par les couches supérieures de l'atmosphère sont trop peu nombreux pour faire impression sur l'œil; on n'obtient donc en réalité que la hauteur des dernières couches qui réfléchissent de la lumière sensible.

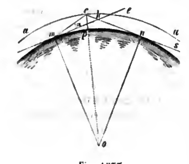


Fig. 1577.

2109. Pronostics tirés du crépuscule. — L'aspect, la durée et les

couleurs du crépuscule du matin et surtout du soir, dépendant de l'état de l'atmosphère, et particulièrement de la quantité de vapeur précipitée qu'elle contient, on conçoit que l'on puisse déduire de l'observation de ces apparences, des probabilités sur le temps qu'il fera dans la journée ou le lendemain.

Quand, après le coucher du soleil, le ciel est d'un jaune blanchâtre à l'occident, et que cette teinte s'étend à une grande hauteur, il est probable qu'il pleuvra pendant la nuit ou le jour suivant. — Des nuages rouges avec des teintes grises annoncent aussi une pluie prochaine ; la coloration étant due à la présence de gouttelettes d'eau qui attestent que l'air est saturé. — Quand le soleil paraît diffus et d'un blanc éclatant avant de se coucher, le temps est à l'orage. S'il se couche dans un ciel légèrement pourpré, l'air étant bleu au zénith, on peut compter sur le beau temps, l'atmosphère étant alors d'une grande pureté. Après la pluie, la présence de légers nuages participant à cette couleur pourprée, confirme le pronostic.

Quand le soleil se lève avec une teinte rouge, il y a probabilité de pluie. Si le ciel présente une teinte rose ou grisâtre, on peut compter sur le beau temps. Dans le premier cas, l'air est pur, et dans le second, les gouttelettes sont peu abondantes, et le soleil les aura bientôt fait évaporer.

2110. Les météores colorés les plus brillants sont produits par le jeu des rayons solaires dans l'eau atmosphérique. Quand cette eau tombe en gouttes à travers l'air, elle forme l'*arc-en-ciel*; si elle est en gouttelettes très fines, comme dans les nuages, elle donne naissance aux *couronnes* et aux phénomènes qui s'y rattachent. Quand elle est congelée en aiguilles très fines flottant dans l'air ou tombant lentement, elle produit les *halos*, les *parhélies*, et les phénomènes concomitants. L'explication des couronnes dépendant de la *diffraction* de la lumière, nous ne nous en occuperons qu'après avoir traité des lois de ce dernier phénomène.

II. De l'arc-en-ciel.

2111. L'*arc-en-ciel* ou *iris*, consiste en une bande d'apparence circulaire, dans la largeur de laquelle sont distribuées les couleurs du spectre, le rouge en dehors, et qui se montre dans la région du ciel opposée au soleil, quand il y tombe de la pluie. Le diamètre apparent de l'arc est constant, et son centre se trouve toujours sur une droite passant par l'œil de l'observateur et par le centre du soleil ; de manière que le point culminant de l'arc est d'autant plus élevé, que le soleil est plus près de l'horizon. Cet arc, nommé *arc principal* ou *arc intérieur*, est le plus souvent accompagné d'un second arc concentrique, de plus grand rayon, mais dans lequel les couleurs, beaucoup plus pâles, sont distribuées dans un ordre inverse, c'est-à-dire que le rouge est en dedans. On le nomme *arc extérieur* ou *second arc*. La théorie indique d'autres arcs (2120), mais ils sont tellement faibles, qu'on ne peut les apercevoir.

On observe souvent l'arc-en-ciel, dans les gouttelettes d'eau qui se séparent des cascades ou des jets d'eau. On peut le produire artificiellement, en lançant avec la bouche de l'eau en gouttes fines, pendant qu'on tourne le dos au soleil.

Les rayons de la lune peuvent produire l'arc-en-ciel. Les circonstances du phénomène et son explication sont les mêmes que pour le soleil ; seulement, *l'arc-en-ciel lunaire*, comme on pouvait le prévoir, est très peu brillant, et les couleurs s'y distinguent à peine ; aussi l'arc extérieur ne se voit-il que très rarement.

Les philosophes anciens avaient remarqué les circonstances dans lesquelles se produit l'arc-en-ciel, et avaient cherché à expliquer ce météore. Comme il se montre toujours à l'opposé du soleil, il était évident que les rayons étaient réfléchis par les gouttes de pluie. Aristote suppose que la réflexion a lieu sur leur surface convexe, et il attribue les couleurs, au mélange des rayons réfléchis avec l'ombre du nuage. Possidonius, puis Sénèque, admettent que l'arc est produit par la réflexion sur un nuage formant un miroir concave. Maurolicus mesure le diamètre angulaire de l'arc, le trouve constant, et cherche à expliquer le phénomène par la réflexion des rayons, en partie sur la surface extérieure des gouttes d'eau, en partie à l'intérieur, où ils décrivent les côtés d'un octogone. Vitellion conclut de la coloration, qu'il y a réfraction en même temps que réflexion. Kepler précise davantage la marche du rayon, qu'il suppose se réfracter en entrant dans la goutte, se réfléchir intérieurement, puis se réfracter de nouveau en émergeant. Antoine de Dominis passe pour avoir donné une théorie assez complète du premier arc-en-ciel ; mais tout ce qu'il a écrit sur ce sujet est vague et confus, et il se trompe complètement quand il veut expliquer l'arc extérieur. C'est à Descartes qu'est due la véritable théorie du brillant météore ; seulement, il laissa son œuvre incomplète ; il ne put rendre compte de l'ordre des couleurs dans les deux arcs, parce qu'il ignorait les lois de la dispersion ; il se contente de dire que la coloration est la conséquence des réfractions qu'éprouvent les rayons lumineux. Il était réservé à Newton, après avoir découvert l'inégale réfrangibilité des rayons colorés, de compléter la théorie de Descartes.

2112. Marche des rayons lumineux dans une sphère transparente. — Le phénomène de l'arc-en-ciel étant produit par la réfraction et la réflexion des rayons lumineux dans les gouttes de pluie, dont la forme est sensiblement sphérique, il nous faut commencer par étudier la marche d'un rayon dans une sphère transparente. Considérons donc un rayon simple *sa* (*fig.* 1578) dirigé dans le plan d'un grand cercle, et cherchons la déviation qu'il a éprouvée quand il émerge. Ce rayon se réfracte d'abord suivant *ab*, en faisant avec la normale *oa* un angle r plus petit que l'angle d'incidence i, et il est dévié de la quantité angulaire $s'ab = i - r$. Arrivé en b, il se réfléchit en partie, en faisant avec la normale *ob* des angles égaux à r, et émerge en partie en faisant l'angle d'émergence $b'be$ égal à i. Le rayon réfléchi *bc* a tourné, pour venir de la direction

de *ab* prolongée à la direction *bc*, d'une quantité égale à $\pi - 2r$. Prenons les arcs *bc*, *cd*, *dn*.., égaux à *ab*, une partie du rayon arrivant aux points *a*, *b*, *c*... se réfléchit, pendant que l'autre partie émerge. A chaque réflexion, le rayon tourne de $\pi - 2r$, et comme en émergeant il tourne de $i - r$, l'angle d'émergence étant égal à i, après m réflexions, la quantité angulaire A dont aura tourné le rayon sera

$$A = 2(i - r) + m(\pi - 2r).$$

Pour déduire de là l'angle que fait le rayon incident avec le rayon émergent, il faudra commencer par retrancher de cette quantité, les tours entiers qu'elle contient, c'est-à-dire 2π autant de fois que possible; ce qui ramènera au point de départ, c'est-à-dire à une parallèle au rayon incident. Il restera alors une quantité moindre que 2π, qui représentera $\pi \pm D$, D étant l'angle du rayon émergent avec la partie *sa* du rayon incident.

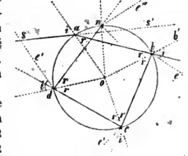


Fig. 1578.

Par exemple, quand il n'y a qu'une seule réflexion, il faut faire $m = 1$, et l'on a $A = 2(i - r) + \pi - 2r = 2i - 4r + \pi$; et il est facile de voir, en menant par le point d'émergence *c*, des parallèles à *sa*, *ab* et *br*, que la quantité angulaire A dont on a tourné le rayon pour venir de la direction *sa* à la direction *ce'*, est égale à $\pi - D$; on a donc

$$A = \pi - D; \qquad \text{d'où} \quad D = \pi - A = 4r - 2i.$$

Après deux réflexions, on aura $A = 2i - 6r + 2\pi$, en faisant $m = 2$; et l'on verrait de même que l'angle de rotation est égal à $\pi + D$, de sorte que l'on a

$$D = A - \pi = \pi + 2i - 6r.$$

2113. Rayons efficaces. — Si l'on considère deux rayons parallèles de même espèce, comme la valeur de A dépend de i, qui n'est pas le même pour ces deux rayons, on voit que, en général, les rayons émergents ne seront pas parallèles, et qu'ils divergeront après s'être croisés, ou sans s'être croisés. Un pinceau de rayons parallèles donnera donc un faisceau divergent, incapable d'agir sur l'œil à une grande distance. Mais si la valeur de A ou de D, est susceptible de prendre une valeur maximum ou minimum, pour une certaine incidence i, comme dans le voisinage des maximum et des minimum, les fonctions varient d'une manière insensible, les rayons incidents voisins de celui qui entre sous l'incidence i, donneront un faisceau cylindrique conservant son intensité à une grande distance. Les rayons qui sont dans ce cas ont été nommés par Newton *rayons efficaces*; les autres sont dits *inefficaces*. Il est facile de

voir que le faisceau efficace sera d'autant plus gros, que le diamètre de la sphère sera plus grand.

Pour trouver l'incidence qui correspond aux rayons efficaces, c'est-à-dire au maximum ou au minimum de A, remplaçons dans l'expression qui en donne la valeur, i par $i+\delta$, r par $r+\delta'$, δ et δ' étant des quantités infiniment petites ; nous obtiendrons une valeur A', dont nous retrancherons celle de A, et égalant la différence à zéro, nous aurons,

$$A'-A=\delta-\delta'-m\delta'=0, \quad \text{d'où} \quad \frac{\delta}{\delta'}=(m+1).. \qquad [1]$$

Or, $\delta : \delta'$ est la limite du rapport de l'accroissement de i à celui de r. Pour trouver cette limite, M. Barry emploie la méthode qui suit : désignons par d et d' deux accroissements correspondants, donnés aux angles i et r. Ces accroissements sont liés par la relation

$$\sin(i+d)=n\sin(r+d'), \qquad [2]$$

n étant l'indice de réfraction de la substance de la sphère, pour l'espèce de rayons considérée. Or, la trigonométrie donne

$$\frac{\sin(i+d)-\sin i}{d}=\frac{\sin(\frac{1}{2}d)}{\frac{1}{2}d}\cos(i+\tfrac{1}{2}d).$$

La limite du premier facteur du second membre, quand d diminue jusqu'à zéro, est égale à 1, et celle du second, à $\cos i$. On a donc, à la limite

$$\frac{\sin(i+d)-\sin i}{d}=\cos i, \qquad \text{ou } \sin(i+d)=\sin i+d\cos i.$$

De même, quand d' décroît, on a, à la limite, $\sin(r+d')=\sin r+d'\cos r$. Quand d et d' diminueront ensemble, l'équation [2] s'approchera donc de la forme

$$\sin i+d\cos i=n(\sin r+d'\cos r), \qquad \text{ou} \quad d\cos i=nd'\cos r;$$

d'où l'on tire enfin *Limite de* $\frac{d}{d'}=\frac{n\cos r}{\cos i}=\frac{\delta}{\delta'}$. Portant cette valeur de $\delta : \delta'$ dans la formule [1], elle devient

$$(m+1)\cos i=n\cos r, \qquad [3]$$

qui, avec $\sin i=n\sin r$, servira à déterminer les angles i et r qui correspondent aux rayons efficaces. Remplaçant dans l'égalité [3] $\cos r$ par sa valeur tirée de $\sin i=n\sin r$, on en tire

$$\cos i=\sqrt{\frac{n^2-1}{(m+1)^2-1}}; \qquad \text{d'où} \quad \cos r=\frac{m+1}{n}\sqrt{\frac{(m+1)^2-1}{n^2-1}}, \qquad [4]$$

formules qui font connaître les angles d'incidence et de réfraction qui correspondent aux rayons efficaces. On voit qu'il ne peut exister de semblables

rayons s'il n'y a pas au moins une réflexion intérieure ; car pour $m = 0$, les *cosinus* deviennent infinis, ce qui indique une impossibilité.

2114. Marche symétrique des rayons efficaces. — Les rayons efficaces suivent dans la sphère une marche symétrique qui n'a pas lieu pour les rayons inefficaces. Il est facile de voir qu'un faisceau qui n'éprouve qu'une seule réflexion doit converger au point de réflexion *b* (*fig.* 1579), pour que le faisceau réfléchi *bc*, symétrique de *ab*, donne un faisceau émergent cylindrique ; et alors la droite *o*D, qui passe par le sommet de l'angle de déviation *a*D*c*, divise la figure en deux parties symétriques. Le point *b* n'est autre chose que le point de rencontre de la demi-circonférence *nbc*, avec la génératrice de la catacaustique *nbx* formée par les rayons parallèles qui se réfractent à la surface sphérique *nac*, considérée comme limitant un milieu indéfini vers la droite ; car

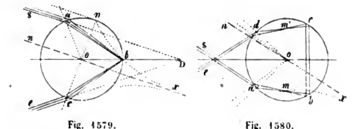


Fig. 1579. Fig. 1580.

chaque point de la surface caustique est formé par la rencontre des rayons réfractés provenant de rayons incidents très voisins. — S'il y a deux réflexions (*fig.* 1580), il faut que le faisceau soit cylindrique entre les deux points de réflexion *b* et *c* ; car alors le faisceau *cde* étant symétrique de *sab* par rapport au diamètre perpendiculaire à *cb*, *de* sera un faisceau cylindrique. Le point *m* appartient à la caustique *mx*, qui a pour axe, *nx* parallèle à *sa*. On verrait de même que, pour que le faisceau émergeant après trois réflexions soit cylindrique, il faut que les rayons convergent au point où se fait la seconde réflexion... En général, quand il y aura un nombre *impair* de réflexions, les rayons qui composent le faisceau efficace devront se rencontrer au milieu de l'arc compris entre les points d'incidence et d'émergence, arc sur lequel sont distribués tous les autres points de réflexion. Quand il y aura un nombre *pair* de réflexions, le faisceau devra être cylindrique entre les deux points consécutifs de réflexion qui se trouvent à égale distance des extrémités de cet arc.

2115. Application au cas d'une sphère d'eau. — Il résulte des formules [4], que les valeurs de *i* et *r* pour un même nombre de réflexions, ne dépendent que de l'indice *n* ; il en est donc de même de la déviation D correspondante. Ces valeurs seront donc différentes pour les divers rayons simples qui composent la lumière blanche. Si l'on considère une sphère d'eau, on a pour les indices des rayons extrêmes du spectre $n_v = \frac{109}{81}$, et $n_r = \frac{108}{81} = \frac{4}{3}$. Faisant

$m = 1$, ce qui suppose une seule réflexion, portant successivement ces valeurs de n_v et n_r dans la formule qui donne $\cos i$, et calculant les valeurs de i au moyen des tables trigonométriques, on trouve :

Pour les rayons *violets*, $i_v = 58°\ 40'$ et par suite, $D_v = 40°\ 17'$.
Pour les rayons *rouges*, $i_r = 59°\ 23'\ 30''$ $D_r = 42°\ 1'\ 40''$.

Dans le cas de deux réflexions, il faut faire $m = 2$, et il vient :

Pour les rayons *violets*, $i'_v = 71°\ 49'\ 55''$ $D'_v = 54°\ 9'\ 20''$.
Pour les rayons *rouges*, $i'_r = 71°\ 26'\ 10''$ $D'_r = 50°\ 58'\ 50''$.

2116. Explication de l'arc intérieur. — L'arc intérieur est produit par les rayons solaires qui ont éprouvé une seule réflexion dans les gouttes sphériques de pluie.

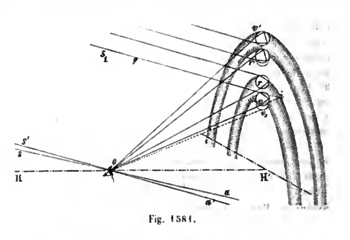


Fig. 1581.

Ces gouttes se succédant très rapidement, il y en a toujours quelques-unes qui rencontrent une droite fixe, de manière que leur centre soit à une distance donnée de cette droite. Les choses se passent donc comme si une de ces gouttes était fixe. Cela posé, soit o la position de l'œil de l'observateur (*fig.* 1581), *so* une droite passant par le point inférieur du disque solaire, et à laquelle tous les rayons partant de ce point sont parallèles, à cause de l'immense distance du soleil. Menons la droite *ov* faisant avec *soa*, du côté opposé au soleil, l'angle *aov* égal à la déviation $D_v = 40°\ 17'$, qui correspond aux rayons *violets* efficaces. Il y aura à chaque instant sur cette ligne une goutte de pluie dans une position convenable pour réfléchir suivant *vo*, les rayons violets efficaces provenant du faisceau incident s_1i, parallèle à *so*, l'angle s_1io étant égal à D_v. L'observateur verra donc un point violet dans la direction *ov*. Supposons

que le plan de la figure tourne autour de *soa*; tout se passant de la même manière dans chaque position de ce plan, pourvu qu'il rencontre des gouttes de pluie, l'observateur verra une ligne violette qui, se trouvant sur la surface d'un cône dont son œil occupe le sommet, se projettera sur le ciel sous forme d'un arc de cercle ayant son centre sur *so*. — Faisons la même construction pour le bord supérieur du soleil; nous aurons une direction ov_1 suivant laquelle on verra aussi un point violet; et comme on peut raisonner de la même manière pour tous les points du disque solaire, on voit que l'observateur verra dans le plan de la figure, un trait violet vv_1, et par conséquent une bande circulaire violette ayant une épaisseur angulaire v_1ov égale à sos', c'est-à-dire au diamètre apparent du soleil, dont la valeur moyenne est de 30'.

Menons la droite *or* faisant avec *soa* un angle égal à la déviation $D_r = 42° \ 1' \ 40''$, qui correspond aux rayons rouges, et une seconde droite faisant le même angle avec *s'oa*, nous verrons, de même, qu'il arrivera de la lumière rouge dans l'angle que font ces deux droites, et que, par conséquent l'observateur verra une bande circulaire rouge d'épaisseur égale au diamètre apparent du soleil, et placée au-dessus de la bande violette.

Les rayons colorés autres que les rouges et les violets, éprouvant des déviations comprises entre celles des rayons de ces deux nuances, produiront d'autres arcs colorés distribués entre les bandes rouge et violette. Tous ces arcs auront 30' d'épaisseur; ils se superposeront donc en partie, et les couleurs en seront peu distinctes, excepté celles des deux bords de l'arc.

L'éclat de l'arc dépend du diamètre des gouttes d'eau; car les faisceaux efficaces ont une section d'autant plus grande, que ces gouttes sont plus grosses (2113). C'est pourquoi les gouttelettes excessivement fines qui forment les nuages, ne produisent pas d'arc-en-ciel; les faisceaux efficaces étant trop fins pour produire une impression distincte de celle de la lumière diffuse répandue dans l'atmosphère.

Dimensions de l'arc intérieur. — L'épaisseur totale rov_1 de l'arc intérieur est égale à la différence $roa - voa = vor$ augmentée du diamètre apparent du soleil, c'est-à-dire à $1° \ 44' \ 40'' + 30' = 2° \ 14' \ 40''$. Newton a vérifié ce résultat par des mesures directes. Il a constaté aussi que le demi-diamètre angulaire du bord intérieur de l'arc est bien égal à $D_v = 40° 17'$.

2117. Explication de l'arc extérieur. — L'arc extérieur, ou second arc, est produit par des rayons qui ont éprouvé deux réflexions dans l'intérieur des gouttes de pluie; c'est pourquoi il est beaucoup plus faible que le premier, une partie des rayons émergeant à chaque réflexion. On se rend compte des diverses particularités de cet arc, par une construction semblable à celle que l'on fait pour l'arc intérieur, en menant les droites *or'*, *ov'* (*fig.* 1581) faisant avec *soa* des angles égaux aux déviations $D'_r = 50° \ 58' \ 50''$, et $D'_v = 54° \ 9' \ 20''$. D'_v étant plus grand que D'_r, le violet sera en dehors et le rouge en dedans. L'épaisseur de l'arc sera $D'_v - D'_r + 30' = 3° \ 40' \ 30''$; et son demi-diamètre intérieur sera D'_r. La distance angulaire entre les bords les

plus rapprochés des deux arcs sera $D'_r - D_r = 12° 7' 40''$. Tous ces résultats ont été vérifiés par Newton.

Quand l'arc-en-ciel est brillant et qu'il se projette sur un nuage sombre, l'espace compris entre les deux arcs paraît plus sombre que le reste du ciel. Cette particularité tient à ce que les rayons réfléchis provenant des faisceaux non efficaces n'ayant pas éprouvé la même déviation que ces derniers, se trouvent plus relevés après une seule réflexion, et plus abaissés après deux réflexions, que les rayons efficaces. Les gouttes d'eau placées entre les deux arcs n'envoient donc aucuns rayons réfléchis à l'œil, rayons qui, quoique divergents, répandent une lueur sensible, dont l'atmosphère est illuminée à l'intérieur du premier, et à l'extérieur du second arc.

Il résulte de la théorie qui précède, que l'arc-en-ciel est un phénomène *local*, c'est-à-dire que deux observateurs ne voient pas le même arc; en effet, quand l'arc est assez rapproché, deux observateurs un peu éloignés l'un de l'autre voient ses extrémités s'appuyer sur des points différents du sol; ce qui s'observe facilement quand l'arc se projette sur une colline éloignée.

2118. Arcs surnuméraires. — Quand l'arc-en-ciel est très brillant, on aperçoit souvent en dedans de l'arc intérieur et en dehors de l'arc extérieur des bandes colorées, désignées sous le nom d'arcs *secondaires*, *supplémentaires* ou *surnuméraires* : immédiatement après le violet, on distingue du rouge, puis du vert et du violet. Quelquefois ces couleurs se répètent plusieurs fois dans le même ordre, le long du bord intérieur de l'arc principal ; elles se montrent plus rarement à l'extérieur du second arc. Young, Arago et M. Babinet attribuent les arcs surnuméraires à des effets de *diffraction*; nous aurons donc à y revenir.

2119. Hauteur des arcs au-dessus de l'horizon. — Soit HH' (*fig.* 1581) l'horizon, et *s'o*H la hauteur du bord inférieur du soleil au-dessus de ce plan ; on voit que l'arc-en-ciel est coupé par ce plan à une distance d'autant plus grande de l'axe du cône sur lequel il se trouve, que l'angle *s'o*H est plus grand. On ne verra donc qu'une partie d'autant plus petite du demi-arc, que le soleil sera plus élevé au-dessus de l'horizon. Quand la hauteur de cet astre sera égale à D_r pour l'arc intérieur, et à D'_r pour l'arc extérieur, ces arcs ne pourront plus se voir, même dans une plaine unie. Aux équinoxes, la hauteur du soleil à midi étant le complément de l'angle de la latitude, on voit que l'arc-en-ciel ne sera pas visible vers l'heure de midi, pour les latitudes moindres que D_r. — Quand le soleil est à l'horizon, on aperçoit la moitié de chacun des arcs. On n'en peut voir davantage dans une plaine; mais quand on se trouve au sommet d'une montagne isolée qui laisse passer latéralement les rayons du soleil voisin de l'horizon, il peut arriver, quand la pluie tombe à une faible distance, qu'on aperçoive un cercle irisé complet.

2120. Des rayons qui ont subi plus de deux réflexions. — La théorie indique qu'un faisceau de lumière peut donner des rayons efficaces après 3, 4, 5.... réflexions. En calculant la déviation de ces rayons

efficaces après trois ou quatre réflexions, on trouve que le faisceau sort, dans ces deux cas, du côté de la goutte opposé au faisceau incident. Pour voir le troisième et le quatrième arc-en-ciel, il faudrait donc se tourner vers le soleil, et il devrait tomber de la pluie entre cet astre et l'observateur. Le diamètre apparent du troisième arc serait de 41° 37' pour les rayons rouges, et de 37° 9' pour les rayons violets; et celui du quatrième arc, de 43° 53' pour les rayons rouges et de 49° 53' pour les violets. Le cinquième arc-en-ciel serait à l'opposé du soleil. — Les rayons lumineux sont tellement affaiblis après trois réflexions qu'il faudrait, pour que le troisième arc-en-ciel fût visible, qu'il tombât des gouttes de pluie d'une grosseur inusitée; aussi il ne paraît pas qu'on ait jamais pu l'apercevoir. M. Babinet rapporte que, se trouvant dans les circonstances les plus favorables, sur le mont Dore et sur le Canigou, ayant en face le soleil couchant et au-dessous, dans l'ombre, des bois de pins formant un fond complètement noir, il lui a été impossible de distinguer le troisième arc. Cependant on cite des observations de trois arcs-en-ciel vus simultanément; mais comme ils étaient tous les trois opposés au soleil, et que les arcs, formés par trois ou quatre réflexions sont du côté de cet astre, un d'eux devait être produit par la réflexion des rayons solaires sur quelque nappe d'eau (2122).

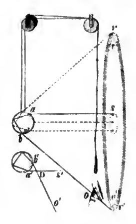


Fig. 1582.

2121. Expériences sur la théorie de l'arc-en-ciel. — Descartes a vérifié la marche des rayons lumineux dans une sphère d'eau, par l'expérience suivante, attribuée quelquefois, à tort, à A. de Dominis. On suspend dans la chambre noire, une sphère en verre mince remplie d'eau, au moyen de cordons passant sur des poulies (*fig.* 1582). On fait tomber sur la sphère, un mince pinceau de rayons solaires *sa* entrant en *s*, et plaçant l'œil en *o*, de manière que l'angle que fait *sa* avec *bo* soit à peu près de 42°; on élève et on abaisse peu à peu la sphère, et quand sa position est telle que l'angle d'incidence correspond aux rayons efficaces rouges, on aperçoit une tache d'un rouge vif dans la direction *ob*. Si alors on laisse *descendre* peu à peu la sphère, on voit la tache lumineuse prendre successivement toutes les couleurs du spectre. Pour peu que l'eau soit trouble, on distingue la marche du faisceau dans ce liquide, et l'on reconnaît qu'il éprouve une seule réflexion. — Si le pinceau tombe sur la partie inférieure de la sphère, comme en *s'a'*, et qu'on place l'œil en *o'*, de manière que l'angle *s'Do'* soit de 44°, on voit, dans la direction *o'b'*, une tache rouge qui devient successivement orangée, jaune, etc., quand on fait *monter* la sphère. On reconnaît aussi, quand l'eau est un peu trouble, que le pinceau subit deux réflexions avant l'émergence.

On peut recevoir le pinceau émergent sur un écran. Si alors on emploie un faisceau incident assez gros pour illuminer la sphère entière, il y a des pinceaux efficaces de toutes les couleurs ayant subi une et deux réflexions, dans chaque section passant par l'axe du faisceau, et ces pinceaux viennent peindre sur l'écran quatre spectres, deux d'un côté du centre et les deux autres du côté opposé, et, par conséquent, il se forme sur l'écran deux cercles irisés qui correspondent aux deux arcs-en-ciel.

On peut, par ce moyen, ou mieux, en recevant les faisceaux émergents dans l'œil, voir le troisième et le quatrième arc au moins. M. Babinet a fait beaucoup d'expériences sur ce sujet[1]. Il a pu, avec des cylindres de verre, distinguer les faisceaux efficaces correspondants à un nombre de réflexions allant jusqu'à quatorze. Sept de ces faisceaux émergent du côté du faisceau incident, les sept autres du côté opposé. Il a aussi opéré en faisant tomber les rayons du soleil ou d'une flamme, sur un jet liquide cylindrique. La déviation observée lui a fourni un moyen original de déterminer l'indice de réfraction de divers liquides, cet indice entrant dans l'expression de la déviation (2113).

2122. Cas particuliers d'arcs-en-ciel. — L'arc-en-ciel présente, parfois, des particularités singulières, mais qui s'expliquent facilement dans la théorie de Newton, et ne font que la confirmer.

Arc-en-ciel à double courbure. — L'iris est placé sur un cône dont le demi-angle au sommet est d'environ 59° pour l'arc principal, et de 71° pour l'arc extérieur, et comme l'œil se trouve au sommet de ce cône, et que le météore se forme ordinairement à une grande distance, il paraît sous la forme d'un cercle. Mais si la pluie qui traverse la région où se forme l'arc, ne tombe pas partout à la même distance de l'observateur, et si les distances sont assez petites pour qu'il puisse les rapporter à des objets terrestres, l'arc lui apparaîtra comme une courbe à double courbure peinte sur la surface d'un cône dont son œil occupe le sommet. Il pourra arriver, par exemple, que l'un des pieds de l'arc, soit caché par une colline, tandis que l'autre se projettera sur des objets placés devant cette colline.

Arcs-en-ciel horizontaux. — On a vu plusieurs fois l'arc-en-ciel se former dans les gouttes d'eau déposées par la pluie ou par la rosée aux extrémités des herbes d'une prairie. L'arc, se trouvant alors sur une surface plane en même temps que sur la surface d'un cône, aura la figure d'une section conique, et on lui verra cette forme, parce que les objets terrestres permettront d'apprécier les distances des différents points d'où partent les rayons efficaces. Soit *aH* (*fig.* 1583) la surface horizontale occupée par les gouttes d'eau, *soa* la droite qui passe par l'œil *o* de l'observateur et par le centre du soleil, dont la hauteur au-dessus de l'horizon est *saH* = *h*. Menons *or*, formant avec *oa* l'angle *aor* égal à la déviation *d* qui correspond aux rayons efficaces. Si nous faisons tourner cette droite autour de *sa*, elle décrira un cône sur lequel sera situé l'iris.

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. IV, p. 645.

Si l'angle $r'oa = d$ est plus grand que h, c'est-à-dire si la hauteur du soleil est moindre que d, le plan aH ne pourra rencontrer l'arête or', et la courbe mn sera une branche d'hyperbole. Si l'on a $h = d$, la droite or' sera parallèle à aH, et la courbe sera une parabole. Enfin, si la hauteur du soleil est plus grande que d, la courbe sera une ellipse d'autant moins allongée que h sera plus grand. Le cas le plus fréquent est celui d'un arc hyperbolique, parce que c'est surtout le matin que les prairies se trouvent couvertes de gouttelettes, formées par la rosée. Ce phénomène a été quelquefois désigné sous le nom d'*arc-en-terre*.

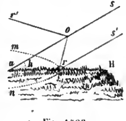


Fig. 1583.

Quand la mer est très agitée, et que les vagues lancent des gouttelettes d'eau, on aperçoit quelquefois des arcs horizontaux, désignés sous le nom d'*arcs-en-ciel marins*. Les couleurs de ces arcs sont généralement peu distinctes, ce qui tient sans doute à l'irrégularité des gouttes d'eau.

Arcs-en-ciel, croisés, renversés. — Quand les rayons solaires se réfléchissent à la surface d'une eau calme, ils prennent la même direction que s'ils partaient de l'image symétrique du soleil formée par le miroir liquide. Ils pourront donc former les deux arcs-en-ciel, dont le centre sera situé sur la droite passant par l'œil de l'observateur et par le centre de l'image du soleil. Si donc la pluie tombe du côté opposé au soleil, on pourra voir, indépendamment des deux arcs directs, un ou deux autres arcs, présentant les mêmes couleurs que les deux premiers, ayant le même diamètre apparent, et les coupant en plusieurs points. Ces arcs sont nécessairement plus élevés que les arcs directs, et leurs points culminants s'écartent d'autant plus de ceux de ces derniers, que le soleil et son image sont plus écartés l'un de l'autre, c'est-à-dire que le soleil est plus élevé au-dessus de l'horizon. Les marins ont souvent été témoins de ce phénomène. Monge en cite un cas remarquable où les quatre arcs étaient parfaitement distincts. Halley observa, à Chester, trois arcs, dont un était formé par les rayons réfléchis sur la rivière de Dee. Cet arc partagea d'abord l'arc *extérieur direct* en trois parties à peu près égales; puis, le soleil s'abaissant vers l'horizon, les points de rencontre se rapprochèrent, se confondirent ensuite en un seul, et les couleurs étant en ordre inverse dans ces deux arcs, la partie où ils étaient superposés se montra d'une blancheur parfaite.

Quand le soleil est assez élevé au-dessus de l'horizon, il peut arriver que l'iris produit par les rayons réfléchis sur la nappe d'eau, forme un cercle entier; et si la partie supérieure vient à manquer, on a un *arc-en-ciel renversé*, phénomène qui a été observé plusieurs fois.

On a souvent désigné, à tort, sous le nom d'arc-en-ciel, les *couronnes*, les *halos* et d'autres cercles irisés, qui se montrent dans certaines circonstances atmosphériques, mais qui en diffèrent essentiellement.

III. Des halos, des parhélies et des phénomènes concomitants.

2123. Description des phénomènes. — Les phénomènes complexes dont nous allons nous occuper sont produits par des aiguilles ou par des lames de glace flottant dans l'atmosphère, ou descendant très lentement à cause de leur petitesse ; leur présence donne à l'atmosphère un éclat particulier et une teinte blanchâtre; ils réfractent ou réfléchissent les rayons solaires, en produisant différents effets dont nous allons d'abord énumérer les principaux.

1° Les *halos* sont deux cercles verticaux *h*, H (*fig.* 1584), concentriques au soleil, d'un rouge pâle en dedans, et blancs ou bleuâtres en dehors où le contour est très diffus. Le diamètre apparent de ces cercles est constant : celui du



Fig. 1584.

petit halo ou *halo intérieur*, *h*, est de 22 à 23°, et celui du *grand halo* ou *halo extérieur* H, de 46°. L'intérieur du petit halo présente une teinte foncée qui contraste avec l'éclat de l'atmosphère à l'extérieur, et forme une aire sombre qui suffit pour faire remarquer le phénomène quand le cercle coloré est à peine visible. Souvent les halos paraissent allongés dans le sens vertical, et semblent diminuer de diamètre à mesure que le soleil s'élève au-dessus de l'horizon; mais ce sont là des illusions qui disparaissent devant des mesures directes.

2° Les *parhélies* ou *faux soleils*, sont des images généralement diffuses du soleil *p*, *p*, qui se montrent aux extrémités du diamètre *horizontal* du petit halo, et un peu en dehors de ce cercle. Ces images sont colorées en rouge en dedans, puis viennent les autres couleurs du spectre, les plus réfrangibles très faibles, et le violet invisible et remplacé par une espèce de queue horizontale blanche de 10 à 20° de longueur, dont l'éclat diminue rapidement. Il se forme aussi des parhélies P, P, sur le halo de 46°, mais plus rarement, et les couleurs en sont généralement très faibles.

3° On voit assez souvent des *arcs tangents a, a* aux extrémités du diamétre vertical du petit halo. Ils sont bordés de rouge en dedans, et leur forme diffère de celle d'un arc de cercle. Quelquefois, ces arcs ne sont visibles que dans les parties voisines du point de contact avec le halo; ils constituent alors ce qu'on nomme quelquefois *parhélies verticaux*.

4° Le halo de 46° peut être accompagné d'*arcs tangents*. Les uns, *c*, sont tangents aux extrémités du diamètre vertical; ils sont horizontaux et ont pour pôle le zénith de l'observateur; c'est pourquoi l'arc tangent supérieur est souvent nommé *cercle circumzénithal*. Les autres arcs sont tangents en des points situés entre les extrémités du diamètre vertical et du diamétre horizontal; ce sont les arcs *infra-latéraux l, l*, et *supra-latéraux*; ils sont symétriques par rapport au plan azimutal du soleil, et leur point de contact dépend de la hauteur de l'astre. Les arcs supra-latéraux sont extrêmement rares.

Les apparences qui précèdent sont produites par réfraction, comme l'attestent les couleurs qu'elles présentent; celles qui suivent, dépourvues de couleurs, sont dues à la réflexion.

5° Le *cercle parhélique*, ainsi nommé par M. Babinet, est un cercle blanc horizontal *bpb* ayant son pôle au zénith, et passant par le centre du soleil, en coupant les deux halos.

6° L'*anthélie* est une image très diffuse du soleil, de même couleur que lui et située sur le cercle parhélique, à l'opposé de cet astre. Quelquefois deux arcs blancs se croisent obliquement sur l'anthélie et s'étendent à des distances qui peuvent être considérables. L'anthélie peut être aussi accompagné de plusieurs images du soleil faibles et diffuses, situées de part et d'autre et symétriquement sur le même cercle; on les nomme *paranthélies*.

7° Les *colonnes verticales* sont des traînées lumineuses blanches verticales, qui accompagnent parfois le soleil, dans les régions polaires, peuvent se voir avant son lever, et s'étendent au-dessus et au-dessous de l'astre, souvent à plus de 25°. Ces traînées forment, avec la partie du cercle parhélique qui coupe le soleil, une croix à bras inégaux dont le soleil occupe le point de croisement. Cette croix peut être entourée par le petit halo.

8° Enfin, les *faux soleils* sont deux images blanches du soleil à contours assez nets, situées au-dessus et au-dessous de l'astre, qu'elles semblent toucher. Elles ne se montrent que lorsque le soleil est prés de l'horizon.

Les phénomènes que nous venons d'énumérer sont quelquefois accompagnés de diverses autres apparences, mais très rares. Ils peuvent être produits par les rayons de la lune et portent alors le nom de *halos lunaires* et de *parasélènes*; mais leur éclat est beaucoup plus faible, et les couleurs sont à peine distinctes. Les explications sont les mêmes quand le météore est produit par le soleil ou par la lune. Ajoutons qu'il est très rare qu'on aperçoive en même temps toutes les apparences dont nous venons de parler; les plus fréquentes sont le *petit halo*, les *parhélies* et le *cercle parhélique*.

2124. Origine des halos et des parhélies. — Les halos et les phéno-

ménes qui les accompagnent ont été décrits par les anciens, qui ont même tenté de les expliquer. Sénèque considère les parhélies comme des images du soleil, formées dans des nuages lisses et brillants. Huyghens, qui le premier a essayé de rendre compte des diverses circonstances du phénomène, supposait qu'il y avait en suspension dans l'atmosphère, des cylindres et des globules de glace opaque enveloppés d'une couche d'eau ; mais de semblables corps n'existent pas dans la nature. Mariotte, vers 1740, puis Venturi, trouvaient la véritable cause des halos et des parhélies dans la présence dans l'air, d'aiguilles de glace à angle réfringent de 60°. La théorie de Mariotte, d'abord abandonnée pour celle d'Huyghens, a été reprise par M. Brewster et par Arago, puis adoptée par tous les physiciens qui se sont occupés du même sujet, parmi lesquels MM. Fraunhofer, Hyoung, Brandes, Brewster, Galle, Babinet, Bravais. Pour l'établir, la première chose à faire est de rechercher si l'on a pu constater la présence des aiguilles de glace pendant l'apparition de halos. Or, c'est ce qui résulte d'un relevé fait par M. Bravais, auquel on doit le travail le plus complet sur ces curieux météores [1]. Plusieurs observateurs ont vu des halos très rapprochés se produire dans une pluie de particules glacées, être interrompus dans les mêmes endroits que cette pluie, et cesser en même temps qu'elle. C'est surtout dans les régions polaires que ces faits ont pu être observés. Quelquefois les parcelles de glace forment une espèce de brouillard d'un éclat éblouissant. Les cirrus étant formés de parcelles de glace, et se montrant à toutes les latitudes dans les régions élevées de l'atmosphère, on conçoit que des halos aient pu être observés en toute saison, et même entre les tropiques, où l'on en a, en effet, plusieurs fois observé. La forme des cristaux de glace flottant dans l'air est très variable; on en voit plusieurs spécimens dans la *fig.* 860 (II, 1177). Les prismes sont généralement hexagonaux; aucun rayon ne peut traverser quand il rencontre deux faces consécutives, dont l'angle est de 120°, mais deux faces séparées par une troisième font entre elles un angle de 60°, et c'est à travers de semblables faces, qui, considérées deux à deux, forment six prismes égaux, que passent les rayons qui produisent les halos.

Puisque ces météores sont produits par la réfraction dans des cristaux de glace, la mesure de l'indice et de la dispersion de la glace devaient précéder toute théorie complète de ces phénomènes. C'est ainsi qu'a procédé M. Bravais; il a taillé en prisme un morceau de glace pure, a dressé ses faces au moyen de plaques de métal chaudes; puis il a engagé le prisme entre deux lames de verre formant un certain angle, et un peu chaudes, de manière que les faces du prisme de glace ne tardèrent pas à coïncider avec ces lames. Il mesura ensuite l'indice de réfraction du rayon moyen dans chaque couleur, et trouva les résultats suivants, à 0,001 près :

[1] *Ann. de ch. et de phys.*, 3e s., t. XXI, p. 36 ; et *Journ. de l'Éc. Polytech.*, t. XVIII.

rouge	*orangé*	*jaune*	*vert*	*bleu*	*violet*
1,3070	1,3085	1,3095	1,3115	1,3150	1,3170.

2125. Explication des halos. — Le halo de 22° a été expliqué par Mariotte et Venturi. Supposons qu'il y ait en suspension dans l'air, entre le soleil et l'observateur, une multitude de petites aiguilles prismatiques de glace, orientées et tournées sur elles-mêmes de toutes les manières : celles qui sont à peu près perpendiculaires à un plan quelconque passant par le soleil et par l'œil de l'observateur, enverront de la lumière réfractée, suivant toutes les directions dans ce plan. Mais il y aura une direction dans laquelle la lumière sera le plus intense. En effet, les prismes, qui sont placés de manière à donner le *minimum de déviation*, peuvent être un peu tournés sur eux-mêmes sans que la déviation change sensiblement. C'est donc comme si les prismes ainsi placés étaient plus nombreux que tous les autres. D'un autre côté, ceux de ces prismes qui tournent sur eux-mêmes, envoient dans l'œil un faisceau de lumière qui ne fait qu'y passer très rapidement. Mais ceux qui sont à une distance angulaire du soleil telle qu'ils jettent dans l'œil les rayons qu'ils réfractent, au moment où ces rayons éprouvent la déviation minimum, produisent une impression plus vive, parce que le faisceau continue à passer par l'œil pendant un déplacement assez étendu du prisme. Les rayons qui passent par l'œil après avoir éprouvé la déviation minimum, se nomment *rayons efficaces*.



Fig. 1585.

La *déviation minimum* d est donnée par la formule $\sin \frac{1}{2}(d+a) = n \sin \frac{1}{2} a$ (1974). Faisant $a = 60°$, et $n = 1,31$ qui est l'indice de réfraction de la glace pour les rayons rouges, on trouve $d = 21° \ 50',2$, ou à très peu près 22°.

Cela posé, soit *pos* (*fig.* 1585) un plan quelconque mené par l'œil *o* de l'observateur et par le centre du soleil, et *p* un prisme perpendiculaire à ce plan. Les rayons partant d'un point du soleil étant parallèles à la droite *so* qui passe par ce point, la déviation dans le prisme *p* d'un rayon arrivant en *o* sera égale à l'angle *o*. Si donc le prisme est à une distance angulaire du soleil égale à 22°, les rayons rouges qui en émergent, arriveront à l'œil après avoir éprouvé la déviation minimum, la lumière sera plus vive dans cette direction que dans toute autre, et l'on observera un point rouge. Si l'on fait la même construction pour tous les points du disque solaire, on aura dans le plan *sop* une bande rouge, et, si l'on fait tourner ce plan autour de *so*, un cercle rouge ayant le demi-diamètre apparent, 22°, du petit halo. Les autres rayons colorés ayant des indices plus grands que les rayons rouges, on voit que *d* sera plus grand, et par conséquent les cercles jaune, vert, etc., se disposeront en dehors du cercle rouge. Les couleurs se superposent en partie, à cause du diamètre

apparent du soleil. Il n'y a que le rouge qui soit à peu près pur. On voit que le halo, comme l'arc-en-ciel, est un phénoméne local, c'est-à-dire que deux observateurs ne voient pas le même halo.

La teinte sombre que nous avons signalée dans l'intérieur du petit halo (2123) s'explique facilement ; car il ne peut arriver aucun rayon réfracté par les aiguilles de glace, dans une direction formant avec *os* un angle moindre que 22°, c'est-à-dire moindre que le minimum. A une distance angulaire du soleil plus grande que 22°, il y aura parmi les prismes orientés de toutes les maniéres, quelques-uns qui enverront dans l'œil des rayons réfractés, ce qui explique l'éclat de l'atmosphére en dehors du petit halo [1].

Halo de 46°. — On a fait beaucoup d'hypothèses pour rendre compte de la formation du halo de 46° ; Cavendish en a donné la véritable théorie. Pour l'exposer, il n'y a qu'à répéter ce que nous venons de dire pour le petit halo ; seulement il faut considérer des angles réfringents de 90°, au lieu d'angles de 60°, angles qui existent dans les prismes hexagonaux à bases planes, dont on a souvent constaté l'existence. Ces prismes présentent douze angles de 90°, formés par les deux bases avec les six faces latérales. Cela posé, la déviation, pour $a = 90°$, est $d = 45° \, 44'$; valeur qui coïncide aussi exactement qu'on peut le désirer avec le demi-diamètre apparent du grand halo. Comme les prismes de glace ne sont pas toujours terminés sur des bases planes, on conçoit que le grand halo soit plus rare que le petit ; les couleurs y sont mieux séparées, parce que l'angle réfringent est plus grand, mais elles sont moins vives, les bases étant de trés petite étendue par rapport aux faces latérales, ce qui fait que les pinceaux émergents ont une trés petite section.

Il peut se former un troisiéme halo, dont le diamétre est de 90°, et dans lequel le violet est intérieur. Ce phénomène, extrêmement rare, est produit par des rayons qui éprouvent avant d'émerger une réflexion totale intérieure, à peu près comme cela a lieu pour le premier arc-en-ciel.

M. Brewster imite les halos, en regardant une bougie à travers une lame de verre recouverte d'une légére cristallisation d'alun ou de chlorure d'étain. Le premier sel permet de distinguer trois cercles concentriques [2].

2126. Explication des parhélies. — Considérons d'abord les parhélies du petit halo, et supposons le soleil à l'horizon. Si l'atmosphére est calme, ce qui a lieu ordinairement quand il se forme des halos, la plupart des aiguilles de glace, gênées par la résistance de l'air, tomberont verticalement. L'éclat du halo sera alors beaucoup plus vif à chaque extrémité du diamétre horizontal, où il y aura une tache brillante rouge en dedans, qui n'est autre chose que le *parhélie*.

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences* de Toulouse, t. IV (1860), p. 470.

[2] Arago a reconnu que la lumière des halos est *polarisée* dans un plan perpendiculaire à leur diamètre ; on en doit conclure, comme nous le verrons plus tard, que cette lumière est réfractée, ce qui vient confirmer les explications de Mariotte et de Cavendish.

Si le soleil s'élève au-dessus de l'horizon, le plan passant par le diamètre horizontal du halo et par l'œil de l'observateur, sera oblique aux prismes verticaux ; les rayons arrivant à l'œil auront donc traversé ces prismes dans une section oblique, et le résultat sera le même que s'ils avaient traversé la section droite d'un prisme de plus grand angle. La déviation minimum sera donc plus grande, et par conséquent les parhélies s'éloigneront du halo. C'est en effet ce qui a lieu ; M. Bravais a calculé l'écart en fonction de la hauteur du soleil, et a trouvé un accord satisfaisant entre les résultats du calcul et les mesures prises dans un grand nombre d'observations, dont il a fait le relevé dans les recueils scientifiques. Le calcul indique que les parhélies sont impossibles quand la hauteur du soleil dépasse 60° 45′; hauteur pour laquelle les rayons incidents et émergents seraient couchés sur les faces du prisme. Mais, en réalité, on n'a pas vu de parhélies quand le soleil se trouve plus haut que 50°; la grande obliquité des rayons incidents occasionnant alors une très grande perte, par les réflexions sur les faces d'entrée et de sortie.

Parhélies de 46°. — Brandes a voulu expliquer ces parhélies de la même manière que ceux du petit halo, au moyen de prismes dont une des arêtes de la base serait verticale, de manière à former un angle réfringent de 90° à arête verticale. Mais, comme le fait remarquer M. Galle, il n'y a aucune raison pour qu'une arête quelconque de la base soit plus souvent verticale que dans toute autre position. M. Bravais pense que les parhélies de 46°, très rares et très peu brillants, sont des effets secondaires de ces derniers; ils seraient produits par des rayons ayant éprouvé des déviations minimum de même sens dans deux prismes verticaux, de manière que la déviation totale, égale à la somme des deux déviations, projetterait l'image formée, à une distance angulaire du soleil, égale à $22° \times 2 = 44°$, qui diffère peu de 46°.

2127. Explication des arcs tangents aux halos de 22°. — Ces arcs *a*, *a* (*fig.* 1584) sont symétriques par rapport à la verticale. Quand le soleil part de l'horizon, les branches forment d'abord un angle de 42° avec la verticale, puis elles tournent peu à peu leur convexité vers le zénith, *ncn′*, (*fig.* 1586). Ce renversement de courbure est très sensible, à partir de 6° du point de contact. Venturi et M. Galle avaient voulu expliquer ces arcs tangents par la réfraction dans les pyramides qui surmontent souvent les petits prismes hexagonaux ; mais Hyoung a trouvé la véritable explication dans la présence de prismes horizontaux flottant dans l'atmosphère, et orientés de toutes les manières. Ceux qui sont perpendiculaires au plan vertical P qui passe par le centre du soleil et par l'œil de l'observateur, et qui sont tournés sur eux-mêmes de manière à lancer dans l'œil des rayons ayant éprouvé la déviation minimum, donnent deux taches brillantes situées l'une au haut, l'autre au bas du halo; ce sont les *parhélies verticaux*. Les prismes horizontaux inclinés par rapport au plan P, envoient à l'œil des rayons, qui, ayant traversé une section oblique, et se trouvant, par conséquent, dans le même cas que s'ils avaient traversé suivant la section droite un prisme à angle plus grand que 60°, auront

une déviation minimum plus grande que les premiers. Ceux de ces prismes qui enverront des rayons efficaces à l'observateur, seront donc d'autant plus écartés du plan P, qu'ils seront plus inclinés sur ce plan. Cette théorie a été adoptée par M. Brande, et par M. Bravais qui, l'ayant soumise au calcul, a trouvé des résultats parfaitement d'accord avec les observations.

Halo circonscrit. — L'observation et la théorie ont prouvé que les branches de l'arc s'abaissent d'autant plus, que le soleil est plus élevé au-dessus de l'horizon. Quand la hauteur est de 20° environ, le calcul indique que les branches des arcs tangents supérieur et inférieur se joignent, de manière à ne former qu'une seule courbe ; mais les parties latérales de cette courbe sont très faibles, et ne commencent à être distinctes que lorsque la hauteur du soleil est de 39 à 40° ; alors la courbe ressemble à une ellipse *acb* (*fig.* 1586), touchant le petit halo en haut et en bas, et nommée *halo circonscrit*. C'est Venturi qui, le premier, a expliqué le halo circonscrit par des prismes horizontaux. Quand ces prismes sont très nombreux, le halo circonscrit peut apparaître pendant que le petit halo est invisible.

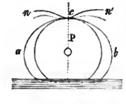


Fig. 1586.

2128. Arcs tangents au halo de 46°. — Ces arcs peuvent être tangents aux extrémités du diamètre vertical, ou latéralement. L'arc tangent supérieur forme souvent la partie la plus brillante du système des halos, les couleurs y présentent un éclat comparable à celui d'un bel arc-en-ciel, les contours en sont très nets et les couleurs bien séparées ; on peut même distinguer le violet. Cet arc paraît horizontal ; il semble entourer le zénith, dont il est écarté de 20 à 25°, et vers lequel il tourne son bord violet ; sa longueur embrasse de 90° à 120° ; il ne se montre jamais quand le soleil est au-dessous de 12° et au-dessus de 31°. Il paraît souvent sans le halo de 46°, tandis que les arcs tangents du petit halo ne se voient jamais sans lui.

Cet arc tangent supérieur a été expliqué par M. Galle, au moyen de prismes verticaux à base plane, que les rayons solaires traversent en entrant par la base et sortant par une face latérale. M. Galle pensait que les rayons ne pouvaient être efficaces que s'ils étaient également inclinés sur les deux faces de l'angle droit ; et il était forcé alors de supposer que les prismes oscillaient autour de leur position verticale, de manière à passer à chaque oscillation par la position convenable. Mais M. Bravais remarque que cette condition n'est pas nécessaire ; il suffit que le prisme soit à une hauteur telle que les faisceaux réfractés, qui sont tous parallèles pour une même orientation des prismes verticaux, passent par l'œil de l'observateur. Cette hauteur dépend de celle du soleil, et est plus grande pour les rayons violets que pour les rouges. Si nous considérons des prismes placés à une certaine distance angulaire du vertical P (*fig.* 1586), il faudra, pour qu'ils envoient dans l'œil le pinceau qu'ils réfractent, que le plan d'émergence passe par l'œil, et par conséquent qu'une

des faces latérales du prisme soit tournée vers l'observateur. Comme le plan d'incidence reste toujours parallèle à P, on voit que le faisceau émergent sera oblique à ce plan. Le calcul montre que, lorsqu'un prisme tourne sur lui-même pendant qu'un rayon fixe entre par sa base, le rayon émergeant par une des faces latérales décrit un cône droit autour de l'axe du prisme. On voit donc que tous les rayons émergents entrant dans l'œil, seront sur un cône vertical droit, ayant son sommet dans l'œil, et que l'arc sera un petit cercle horizontal ayant son pôle au zénith. — L'*arc tangent inférieur* ne se voit que très rarement; il faut que le soleil soit au moins à 46° de l'horizon; il s'explique, du reste, de la même manière; seulement les rayons solaires entrent, dans ce cas, par la face latérale des prismes verticaux, et sortent par la base inférieure.

Les arcs *infra-latéraux* et *supra-latéraux* sont engendrés par des prismes horizontaux; aussi se montrent-ils quand les arcs tangents au petit halo sont très brillants. Leur position dépend de la hauteur du soleil. M. Bravais en a développé la théorie par le calcul, et a retrouvé par ce moyen toutes les circonstances du phénomène.

2129. Reproduction artificielle des phénomènes engendrés par des prismes verticaux. — M. Bravais reproduit ces sortes de phénomènes, au moyen d'un petit appareil qui consiste simplement en un prisme vertical *p* (*fig.* 1587) fixé sur un arbre qu'un ressort d'horlogerie fait tourner avec une vitesse d'une centaine de tours par seconde, de manière à réaliser en un temps très court la série des positions des prismes verticaux de glace. L'appareil est installé dans une chambre obscure. Pour imiter les parhélies, on place une bougie B à une distance de 7 à 8 mètres de l'appareil et à la même hauteur que le prisme; on couvre une des faces de ce dernier, et le regardant pendant qu'il tourne, dans une direction faisant un angle de 20 à 25° avec la ligne *o*B, de manière que les rayons qui arrivent à l'œil *o* aient éprouvé la déviation minimum, on aperçoit une image irisée de la bougie, le rouge en dedans, avec une queue blanche en dehors.

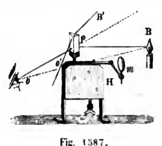


Fig. 1587.

Pour imiter les cercles tangents circumzénithaux, on masque deux faces du prisme, et l'on place la bougie en B', de manière que l'angle formé par les rayons qui tombent sur la base supérieure fassent un angle de 15 à 20° avec l'horizon. On place l'œil en *o'* très près du prisme, et l'on aperçoit, pendant la rotation, un arc irisé au plafond de la chambre. Quelquefois le cercle est double, ce qui provient de réflexions intérieures, qu'on peut éviter en couvrant de papier noir les parties inférieures de la face non masquée. — Dans ces expériences, il est nécessaire de masquer certaines faces, parce que les arêtes ne sont pas toujours exactement parallèles, et alors les apparences sont multiples.

2130. Explication du cercle parhélique. — Ce cercle, qui passe par

le soleil, et aussi nommé *cercle blanc*, est produit par réflexion, comme Huyghens l'a admis dès le principe. Young l'a expliqué par la réflexion sur des prismes verticaux supposés en majorité, et orientés de manière à envoyer des rayons réfléchis à l'observateur. Le cercle parhélique est toujours horizontal; car, quelle que soit la hauteur du soleil, l'image de cet astre est toujours symétrique par rapport à la surface réfléchissante, qui est verticale. M. Babinet joint aux réflexions sur les faces latérales des cristaux verticaux, celles qui se font sur les bases de lames prismatiques, tombant les bases verticales; et M. Bravais, les réflexions multiples, qui peuvent avoir lieu dans l'intérieur des prismes verticaux.

M. Babinet imite le cercle blanc, en regardant une bougie ou le soleil, à travers un cristal à structure fibreuse, taillé en lame parallèle aux fibres que l'on place verticalement; on voit alors une bande horizontale blanche, produite par les fibres miroitantes orientées de toutes les manières.

On voit, très rarement, des cercles parhéliques inclinés à l'horizon. M. Galle et M. Bravais les attribuent à des réflexions sur les faces de pyramides terminant les prismes verticaux.

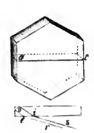


Fig. 1588.

2131. Anthélies et paranthélies. — L'*anthélie*, qui se montre à l'opposé du soleil sur le cercle parhélique, a été expliqué par M. Bravais, au moyen de lamelles hexagonales tombant verticalement un angle en bas, c'est-à-dire de manière que l'axe cristallographique soit horizontal. Ces lamelles présentent ainsi différents angles réfringents : 1° en considérant deux faces latérales non contiguës, il y a trois angles dièdres de 60° à arêtes horizontales; 2° quatre angles de 90° à arêtes verticales, et pouvant donner lieu au parhélie de 46° (2126); 3° huit angles droits à arêtes inclinées de 30° sur l'horizon. Cela posé, soit *ac* (*fig.* 1588) un plan horizontal traversant le cristal. Un rayon réfléchi en dedans en rencontrant les quatre faces verticales, comme on le voit en *sioer*, reviendra sur lui-même après avoir éprouvé deux réflexions, et produira dans les lamelles opposées au soleil et convenablement orientées, une tache brillante qui ne sera autre chose que l'*anthélie*. Si le soleil s'élève au-dessus de l'horizon, il en sera de même, seulement le plan *ac* sera oblique aux arêtes verticales du prisme.

Les arcs obliques qui se croisent à l'anthélie, et qui se prolongent quelquefois jusqu'au soleil, sont attribués par M. Bravais, à des stries d'accroissement qui recouvrent parfois les bases hexagonales des lamelles de glace. S'il y a un grand nombre de cristaux orientés de la même manière, ces stries donneront lieu à des effets lumineux.

Les *paranthélies* sont produits par des réflexions sur des aiguilles verticales présentant des angles rentrants, dont la section a, par exemple, la forme d'une étoile à six ou à un plus grand nombre de pointes. La réflexion *intérieure* sur

deux faces formant quelques-unes des pointes, donnera, pendant que les cristaux tournent sur eux-mêmes, une déviation constante égale au double de l'angle des faces réfléchissantes (1905). Les cristaux qui seront convenablement orientés, et à une distance angulaire de l'azimut du soleil égale à la déviation, donneront une image de cet astre, qui sera un paranthélie. La déviation, et par conséquent la position de cette image, dépendant de l'angle des deux faces réfléchissantes, on conçoit que les paranthélies se montreront à des distances variables de l'anthélie, suivant le nombre d'angles rentrants du cristal. On n'a observé de paranthélies que dans un espace compris entre 90° et 140° du soleil. Ils peuvent être colorés; cela dépend de la manière dont se combinent les réfractions et les réflexions intérieures (2031).

2132. Reproduction artificielle du cercle parhélique et des anthélies. — Le prisme tournant *p* (*fig.* 1587) placé à une distance de 7 à 8 mètres à la hauteur de la bougie B, laisse voir de la lumière blanche réfléchie, dans quelque direction que l'on regarde; cette lumière est celle qui forme le cercle parhélique. Si l'on emploie un prisme creux en verre, et si l'on regarde à 12° de la bougie, on voit une tache blanche qui est un paranthélie. Si l'on remplit ce prisme d'eau, on voit, à 98°, un paranthélie coloré ayant le rouge à l'opposé de la bougie.

Pour reproduire l'anthélie, on installe sur l'axe tournant, une plaque de verre formant un parallélipipède rectangle, dont quatre faces sont placées bien parallèlement à l'axe de rotation. Comme les rayons incidents seraient interceptés par la tête de l'observateur, puisque les rayons qui produisent l'anthélie reviennent dans la même direction, on fait réfléchir les rayons par un petit miroir *m* (*fig.* 1587), fixé à un support articulé. Trois des faces latérales de la plaque étant masquées, on voit une tache blanche produite par une réflexion intérieure; c'est l'anthélie.

On imite les arcs obliques qui passent quelquefois par l'anthélie, en recouvrant la face de la plaque tournante, d'une couche grasse imperceptible, sur laquelle on produit des stries obliques bien parallèles entre elles, au moyen d'une brosse guidée par une règle.

2133. Colonnes verticales et faux soleils. — Venturi attribuait les lueurs verticales, à la réflexion des rayons solaires sur des prismes horizontaux à axe perpendiculaire au plan azimutal du soleil. M. Babinet a complété cette théorie en admettant des prismes à axe très court, tendant à tomber les bases verticales, et orientés de façon que ces bases soient parallèles au plan azimutal du soleil. Les réflexions sur les faces latérales produisent des images solaires dont la hauteur dépend de l'inclinaison de ces faces sur l'horizon, et qui ne peuvent se voir que dans le vertical de l'astre passant par l'œil. M. Bravais suppose des réflexions sur les bases planes, ou mieux terminées par des tablettes planes (II, 1177), de prismes verticaux oscillant pendant leur chute, de manière à présenter périodiquement leurs bases sous différentes

obliquités aux rayons solaires. Quand la traînée est très longue, il admet plusieurs réflexions dans l'intérieur du cristal.

M. Kaemtz a été témoin d'un phénomène qui vient à l'appui de l'explication de M. Babinet. Il a vu une traînée lumineuse qui, partant du soleil, se continuait sur le sol et arrivait jusqu'à ses pieds. L'atmosphère était remplie de lames hexaédriques de $\frac{1}{2}$mm de diamètre, à bases très brillantes.

Les *faux soleils* n'ont pas reçu jusqu'à ce jour d'explication complète. Quelques physiciens ont voulu y voir des effets de mirage, d'autant mieux qu'ils ne se montrent que lorsque le soleil est tout près de l'horizon. M. Bravais est parvenu à très bien représenter les différents cas observés, en supposant des prismes verticaux terminés par des pyramides dont les faces sont inclinées de 89° 58′ sur l'axe. Les rayons qui, entrant par une face latérale du prisme, éprouvent deux réflexions totales intérieures, sur deux faces opposées de la pyramide formant un angle de 179° 46′ et sortant par la face opposée du prisme, donneraient lieu à l'une des images du soleil ; l'autre serait produite de la même manière, par la pyramide opposée.

2134. Remarque. — Il résulte des différentes explications que nous venons d'exposer, que les divers phénomènes qui constituent le système des halos sont produits par des cristaux de glace de formes différentes ou différemment placées. Il doit donc arriver rarement que les diverses conditions soient réalisées toutes en même temps, ce qui explique pourquoi l'on n'observe ordinairement qu'une partie des phénomènes. C'est dans les régions polaires qu'on devra observer le plus souvent les apparences les plus complètes, et c'est en effet ce qui a lieu. Quant au petit halo, il peut être fréquent dans des latitudes assez basses. Nous en avons observé 12 cas plus ou moins brillants, à Toulouse, au printemps des années 1860 et 1861 [1].

Indépendamment des phénomènes que nous avons décrits, il se présente, mais très rarement, d'autres cercles, concentriques au soleil, ou coupant horizontalement les halos au-dessus ou au-dessous de l'astre, ou en passant par son centre, ou bien des arcs tangents, des parhélies blancs ou colorés autres que ceux dont nous avons parlé. Ces apparences nouvelles sont produites par des faces pyramidales terminant les cristaux ; par des rayons qui ont subi plusieurs réflexions intérieures ; par des rayons qui ont traversé successivement plusieurs cristaux ; ou enfin, par les parhélies ou les différents arcs que nous avons étudiés, se comportant eux-mêmes comme sources de lumière, et donnant lieu à des systèmes d'apparences semblables, mais très faibles. On conçoit combien les phénomènes doivent être compliqués, quand il se produit ainsi des effets secondaires.

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences* de Toulouse, t. V (1861), p. 413.

CHAPITRE V.

DE LA VISION.

§ 1. DE LA VISION SIMPLE.

I. Description de l'organe de la vue et mécanisme de la vision.

2135. La *vision* est le phénomène par lequel nous connaissons, au moyen de l'organe de la vue, la forme, les couleurs et, en général, toutes les qualités des corps qui dépendent de la lumière. Une simple impression produite par la lumière ne constitue pas la vision. Ainsi, on ne *voit* pas, quand on reçoit dans l'œil la lumière qui a traversé une feuille de papier ou du verre dépoli ; il faut, pour qu'il y ait *vision*, que l'on puisse discerner la forme et les détails des corps lumineux ou éclairés. — La vision peut être *simple*, quand l'organe de la vue est abandonné à ses seules ressources, ou *composée*, quand l'organe est aidé par des instruments d'optique destinés à en étendre les limites. Nous allons d'abord nous occuper de la *vision simple*.

2136. Appareil de la vision chez l'homme. — L'appareil de la vision chez l'homme consiste principalement en deux globes NT (*fig.* 1589) contenant différentes humeurs. Ces globes sont logés dans des cavités pyramidales, formées par certains os du crâne et de la face, et nommées *orbites* de l'œil ; ils sont préservés du contact des parois osseuses par des masses de graisse. Trois paires de muscles impriment à chaque globe NT (*fig.* 1589) divers mouvements sur lui-même. Les *muscles droits*, au nombre de quatre, le meuvent, les uns, *m*,*m*, dans le plan vertical, les autres dans le plan horizontal, avec une amplitude de 110° environ. Les deux *muscles obliques* le font tourner autour d'un axe dirigé d'avant en arrière ; ils sont dirigés obliquement, celui qui se trouve du côté du nez étant plus haut que l'autre. Le globe de l'œil est retenu dans son orbite par ces six muscles, et aussi par une membrane *aa* qui adhère à sa surface antérieure, et se rattache à la partie interne des paupières *pp*. Cette membrane, nommée *conjonctive*, se replie sur elle-même quand celles-ci se ferment, et dans ce mouvement elle étend sur la surface antérieure de l'œil un liquide aqueux destiné à l'humecter, et sécrété par la *glande lacrymale*, située derrière la conjonctive, à la partie externe et supérieure du globe de chaque

œil. L'excédant de ce liquide se rend dans les narines par un petit canal qui s'ouvre à l'angle interne des paupières. Quand la sécrétion est trop abondante, comme cela a lieu sous l'influence des émotions de l'âme, ou par l'action de l'air froid, de vapeurs irritantes, ce liquide déborde et forme les *larmes*. Les *sourcils* arrêtent la sueur qui découle du front, et interceptent la lumière qui vient d'en haut ; la saillie osseuse de l'arcade sourcilière préserve le globe de tout choc. Les *cils* arrêtent les impuretés qui flottent dans l'air et qui viendraient ternir la surface de la conjonctive, et y produire une irritation douloureuse.

2137. Description du globe de l'œil. — La figure 1589 représente une coupe du globe de l'œil par un plan vertical, avec des dimensions à peu près doubles de la grandeur naturelle. Ce globe est formé d'une enveloppe

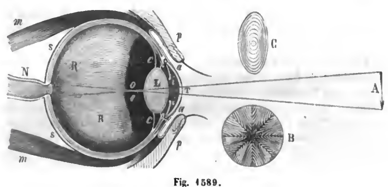


Fig. 1589.

composée de deux parties de courbure différente. L'une *ss*, très résistante, blanche, opaque, forme la plus grande partie de l'enveloppe ; on la nomme *cornée opaque* ou *sclérotique*. L'autre, T, d'un moindre rayon, placée en avant, est transparente et incolore ; on peut sentir la saillie qu'elle forme, en appuyant le doigt sur la paupière abaissée et faisant mouvoir l'œil ; on la nomme *cornée transparente*. Ces deux parties de l'enveloppe, de structure différente, sont soudées l'une à l'autre par leur bord taillé en biseau; on peut les séparer, après la mort, par la macération.

Iris, pupille. — Derrière la cornée transparente est tendue verticalement la membrane de l'*iris ii*, diaphragme circulaire, coloré en brun, bleu ou gris, et formant la prunelle, autour de laquelle on aperçoit une partie de la sclérotique formant le blanc de l'œil. La membrane de l'iris est formée de fibres rayonnantes transparentes ; son opacité et sa coulenr proviennent d'une membrane très mince, l'*uvée*, qui la tapisse en dedans, et sur laquelle on distingue des dessins irrégulièrement rayonnés, formés par un lacis très délicat de nerfs et de vaisseaux. La membrane de l'iris est percée d'une ouverture circulaire nommée *pupille*. Cette ouverture peut s'agrandir par la contraction par plisse-

ment des fibres rayonnantes de l'iris, et se rétrécir par la contraction de fibres circulaires formant un bourrelet sur son contour du côté interne. Les fibres de l'iris sont excitables par l'électricité ; seulement, au lieu de se contracter brusquement, comme les fibres musculaires, elles le font avec une lenteur caractéristique.

Cristallin. — Derrière la pupille se trouve le *cristallin* L, corps lenticulaire transparent, assez mou, et dont la face postérieure est plus convexe que l'antérieure. Il contient de l'albumine et de la gélatine en quantités telles qu'il se coagule entièrement dans l'eau bouillante. Il est formé de couches superposées, figurées à part en C, dont l'indice de réfraction va en augmentant de l'extérieur à l'intérieur. Suivant Brewster et Gordon, l'indice des couches extérieures est 1,377, celui des couches moyennes 1,386, et celui des parties centrales 1,399. Le cristallin est enveloppé d'une membrane mince, qui forme la *capsule cristalline* ; il est soutenu, sur son contour, par une membrane plissée, la *couronne ciliaire*, dont les plis triangulaires se nomment *procès ciliaires*. La ligne droite, qui passe par le centre de la pupille et le centre de figure du cristallin, forme l'*axe de l'œil*.

Chambres de l'œil. — Le cristallin et la couronne ciliaire divisent l'œil en deux parties inégales nommées *chambre antérieure* et *postérieure*. La chambre antérieure est remplie d'un liquide, l'*humeur aqueuse*, qui n'est que de l'eau contenant de très petites quantités de gélatine et d'albumine. Son indice de réfraction, 1,337, ne dépasse que de 0,001 environ celui de l'eau. La *chambre postérieure* est remplie d'une substance incolore, parfaitement transparente ayant la consistance d'une gelée tremblante ; c'est l'*humeur vitrée*, ou *corps vitré*, dont l'indice de réfraction est 1,339.

Hyaloïde. — Le corps vitré est enveloppé par une membrane transparente très délicate, l'*hyaloïde*, dont une partie recouvre le cristallin pour former la *capsule cristalline*. Demour, en 1741, a annoncé que l'hyaloïde envoie des replis multipliés à travers le corps vitré, de manière à le soutenir sans que ses parties supérieures compriment les parties inférieures. Mais ce fait a été contesté depuis, et on n'est pas d'accord sur la structure du *corps vitré*, que certains physiologistes supposent formé de couches concentriques.

Choroïde. — L'intérieur de la sclérotique est tapissé par la *choroïde*, membrane mince sur laquelle est appliquée l'hyaloïde, et qui est garnie de fibres et de vaisseaux par lesquels elle adhère à la sclérotique ; sa face antérieure est recouverte d'un pigmentum noir. Les procès ciliaires appartiennent à la choroïde ; on peut donc dire que c'est par cette membrane que le cristallin est fixé par son contour. Elle s'étend en avant sur la partie postérieure de l'iris, où elle constitue l'*uvée* qui lui donne sa couleur [1].

Rétine. — La partie la plus importante de l'œil, celle qui reçoit l'impres-

[1] Ce pigmentum noir manque chez les albinos ; il en résulte que le fond de leur œil se voit à travers la pupille, et paraît rouge.

sion de la lumière, est la *rétine*. On nomme ainsi une membrane nerveuse, formée par l'épanouissement d'un gros nerf, le *nerf optique* N qui traverse la sclérotique et la choroïde, sur lesquelles il étale ses fibrilles RR, en formant un réseau très délicat. Ce nerf, qui sort du cerveau et appartient à la deuxième paire, entre dans l'œil latéralement, du côté du nez.

Le tableau qui suit contient les dimensions et les rayons de courbure moyens des différentes parties de l'œil humain.

	DIMENSIONS.	MILLIMÈTRES	NOMS des OBSERVATEURS.
Profondeur de l'œil.	....	22 à 24	Petit.
Sclérotique	Rayon de courbure......	10 à 11	Petit.
	Épaisseur.............	1,27 à 1,39	Krause.
Cornée transparente.	Rayon de courbure......	7 à 8	Petit.
	Épaisseur.............	0,92 à 1,16	Krause.
	Distance à l'iris........	2,47 à 3,24	Krause.
Iris et pupille.....	Diamètre de l'iris.......	11 à 12	Petit.
	Diamètre de la pupille ...	3 à 7	Petit.
	Distance au cristallin ...	1	Petit.
Cristallin.........	Diamètre	9,26 à 9.49	Krause.
	Épaisseur.............	4,63 à 7,17	Krause.
	Rayon antérieur........	7 à 10	Petit.
	Rayon postérieur........	5 à 6	Petit.

Les rayons de courbure ont été évalués en supposant que les surfaces appartiennent à des sphères ; ce qui n'est vrai qu'approximativement. Il résulte des mesures de MM. Chossat, Krause, Vallée..., qui ont mesuré les distances des différents points de ces surfaces à un plan perpendiculaire à l'axe de l'œil, qu'elles appartiennent à des ellipsoïdes à peu près de révolution autour d'un axe dirigé d'avant en arrière.

2138. Mécanisme de la vision. — Considérons un objet A (*fig.* 1589) situé à une distance assez grande de l'œil; les rayons qui, partis de ses différents points, entreront par la pupille, ayant à traverser différents milieux terminés par des surfaces à peu près sphériques, iront former sur la *surface concave* de la rétine une image renversée de l'objet A. Pour construire cette image, il faudra mener des différents points de A, des axes secondaires passant par le centre optique *o* du système lenticulaire composé du cristallin et du ménisque formé par l'humeur aqueuse ; centre optique qui, d'après Volkmann et M. Vallée, est situé dans le corps vitré, à une petite distance du cristallin.

Nous obtiendrons ainsi le lieu de l'image très petite de l'objet. Cette image est renversée, et chacun de ses points étant le foyer conjugué d'un point correspondant de l'objet, la rétine sera impressionnée par la lumière qui y est concentrée, et l'impression se transmettra jusqu'au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique.

Vérification par l'expérience. — Le phénomène de la vision consiste dans la formation de l'image au fond de l'œil; l'existence de cette image peut se constater directement : on prend un œil fraîchement extrait du cadavre, et, après l'avoir débarrassé des muscles et des masses de graisse qui l'enveloppent, on amincit la partie postérieure de la sclérotique, au point de la rendre translucide. On engage ensuite l'œil ainsi préparé dans une ouverture pratiquée au volet d'une chambre obscure, et l'on voit, à travers la rétine et la sclérotique, l'image renversée et très petite des objets extérieurs. — On peut encore procéder en pratiquant à la partie supérieure de la sclérotique, une ouverture par laquelle on regarde en dedans à travers le corps vitré, l'image formée sur la rétine. Magendie a eu l'idée d'expérimenter avec des yeux d'animaux albinos, par exemple, de lapins blancs, dont la sclérotique est translucide, de sorte qu'il n'y a qu'à enlever les muscles et la graisse.

2139. Les philosophes de l'antiquité n'avaient sur la vision que des opinions erronées. Les pythagoriciens supposaient un feu invisible allant de l'œil palper les objets; c'était le *souffle visuel* des stoïciens. Leucippe suppose des images ou simulacres des objets, flottant autour d'eux, et allant à l'âme en passant par l'œil. Empédocle admet des effluves partant à la fois des corps et des yeux et allant les unes vers les autres. Démocrite, qui regardait la lumière comme une émanation des corps, vise plus juste, quand il dit que l'humeur de l'œil forme un miroir dans lequel se peignent les objets. Euclide, Ptolémée, Héliodore, dont il nous reste quelques fragments sur l'optique, considèrent un cône de rayons partant de l'œil et enveloppant l'objet. Galien a fait faire un grand pas à la question, en découvrant le point de départ des nerfs dans le cerveau, distinguant les nerfs des sens, et en particulier le nerf optique, dont la rétine est une expansion qui arrive jusqu'au *glacial* (cristallin), qui se trouve en être ainsi la terminaison. Mais il regarde le cristallin comme l'organe qui reçoit l'impression, erreur qui a régné pendant longtemps dans la science, et que l'on enseignait encore plus de cinquante ans après la découverte des images faites au fond de l'œil. Alhazen, puis Vitellion et Maurolicus, reconnaissent le rôle de la réfraction dans la vision, mais aucun d'eux n'arrive encore à la formation des images. Porta compare l'œil à une chambre noire *simple*, dont la pupille serait l'ouverture, et le cristallin l'écran sur lequel irait se former l'image. Léonard de Vinci avait déjà émis une idée semblable et reconnu que l'image devait être renversée. Enfin, Kepler, après l'invention de la chambre noire à lentille, dévoile le rôle du cristallin, et découvre la formation de l'image sur la rétine, après avoir été longtemps arrêté par la difficulté qu'il trouvait à l'admettre renversée. Certains auteurs lui attribuent d'avoir, le premier, vérifié le fait par l'expé-

rience. Du reste, la préoccupation de vouloir l'image droite a contribué à faire dévier de la bonne route Alhazen et d'autres physiciens, qui avaient tellement approché de la découverte, qu'on est étonné qu'ils n'aient pas su faire le dernier pas.

La découverte des images formées sur la rétine est un fait immense, et constitue une des plus belles découvertes de la physiologie des sens. Mais si le fait en lui-même nous donne la clef du mécanisme de la vision, il reste à expliquer un grand nombre de circonstances relatives au mode de formation et à la netteté de l'image, et à la manière dont nous pouvons rapporter les impressions reçues par la rétine à la cause extérieure qui les engendre. Nous allons passer en revue ces différents points. Ce sujet présente de nombreuses difficultés, les expériences étant très délicates et souvent impossibles. Divers mathématiciens, MM. Sturm, Vallée, Gauss, Bessel, ont traité la question par l'analyse, en partant des courbures des surfaces de séparation des milieux que renferme l'œil, des indices de ces milieux et de la structure du cristallin; mais ces données sont assez incertaines; aussi ces travaux, très remarquables au point de vue mathématique, n'ont-ils que peu ajouté à nos connaissances relatives aux conditions physiques de la vision.

II. De la netteté de l'image et des conditions de sa formation.

2140. L'œil est dépourvu d'aberration de sphéricité. — Nous admettrons, avec tous les physiologistes, que la perception est nette quand l'image sur la rétine est nette, et réciproquement; et nous considérerons toujours, si ce n'est quand nous avertirons du contraire, des yeux à l'état normal, c'est-à-dire ne présentant aucun de ces défauts que l'on rencontre si souvent parmi les gens d'étude, qui fatiguent outre-mesure un organe délicat ayant besoin, plus que tout autre, d'un repos fréquent et prolongé.

Le premier point à remarquer, c'est que l'œil est dépourvu d'*aberration de sphéricité*; car les images se forment avec netteté sur la rétine, comme l'atteste la facilité avec laquelle nous distinguons les détails des objets qui ne sont ni trop petits, ni trop éloignés ou trop rapprochés. Cette perfection des images tient à trois circonstances: 1° aux courbures de la cornée et des faces du cristallin, qui appartiennent à des ellipsoïdes (2137); 2° à la présence de la membrane de l'iris, diaphragme à ouverture variable, qui arrête les rayons trop écartés de l'axe du cristallin; 3° à la forme concave de la rétine (1992).

Jeu de la pupille. — La pupille se rétrécit quand on regarde les objets rapprochés, et s'élargit pour les objets éloignés. Il est facile de s'en assurer en se regardant dans un miroir; on voit la pupille s'élargir quand on éloigne le miroir, et se rétrécir, avec assez de lenteur pour qu'on puisse en suivre les mouvements, quand on le rapproche brusquement.

Les variations de la pupille sont aussi produites par les changements d'in-

tensité de la lumière, comme on peut le vérifier dans une glace, en interceptant avec un écran et laissant passer alternativement une vive lumière qui arrive à l'œil. Le diamètre de la pupille peut varier ainsi, suivant Hyoung, de 3^{mm} à 7^{mm} environ. Les variations sont faciles à observer chez certains animaux qui, comme les chats, ont la pupille en forme de fente verticale; cette fente, très étroite au grand jour, s'élargit latéralement au point de devenir circulaire quand il fait très sombre.

Comme chacun des points d'un objet lumineux ou éclairé envoie des rayons divergents, dont l'intensité varie en raison inverse du carré de la distance, on pourrait croire que le rétrécissement de la pupille, quand on regarde des objets rapprochés, est occasionné par l'excitation que produit une lumière plus vive. Ce mouvement serait donc automatique et indépendant de la volonté. Il est incontestable que l'action de la lumière détermine la contraction de la pupille; mais, comme l'admettait Descartes, la volonté intervient aussi, et l'effort que l'on fait pour voir nettement les objets rapprochés est accompagné du rétrécissement de la pupille. En effet, Magendie a constaté que la pupille se resserre quand, avec une même intensité lumineuse, on cherche à distinguer un objet très petit. Si, comme l'a fait Dugès, on cache un des yeux avec la main, et qu'on le découvre ensuite subitement, on voit, dans un miroir, la pupille de l'autre œil se rétrécir, quoiqu'il reste soumis à l'action de la même lumière, à cause de l'habitude qu'il a contractée d'avoir ses mouvements concordants avec ceux de l'autre œil.

2141. Champ de la vision. — On appelle ainsi, soit l'espace angulaire dans lequel sont compris les objets qui peuvent envoyer des rayons dans l'œil, soit l'espace dans lequel ils doivent être renfermés pour donner une image *nette* sur la rétine. Ce dernier espace, très étroit, comme nous allons le voir, est le *champ de la vision nette*. Le champ, dans la première acception, est, d'après M. Brewster, de 120° dans le sens vertical, et de 150°, dans le sens horizontal. Cette grande étendue provient de la courbure de la cornée transparente, qui forme le sommet du grand axe d'un ellipsoïde, ce qui est favorable à l'entrée des rayons très obliques. Chaussat a constaté cette forme, sur l'œil du bœuf [1]. Pour cela, il plaçait l'œil dans une caisse rectangulaire pleine d'eau, et projetait sur une lame de verre dépoli, au moyen du mégascope, l'image grossie huit à dix fois, de la cornée vue de profil. Il en traçait le contour, puis menant sur le dessin, des ordonnées et des abcisses, il les mesurait et cherchait si la courbe pouvait satisfaire à l'équation d'une ellipse, dont il calculait les axes au moyen de deux couples de ces coordonnées. Il a reconnu aussi que l'axe de l'ellipsoïde fait, dans le plan horizontal et du côté interne, un angle de 9 à 10° avec l'axe perpendiculaire au centre de la pupille. Cet angle, que M. Sœmmering fils a aussi trouvé dans l'œil du cheval, existe-t-il chez l'homme? Cela est peu probable. Les animaux, dont il est question ici,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. X, p. 337.

ayant les yeux placés latéralement à la tête, cette déviation des axes vers le nez a chez eux une utilité qui n'existe pas chez l'homme, dont les yeux sont placés en avant. M. Chaussat a trouvé à la cornée de l'éléphant une courbure d'hyperboloïde; Demours pensait que celle de l'homme présentait une semblable courbure; cela peut être pour des yeux très myopes ; il en est même dont la cornée est presque conique ; mais il résulte des recherches de MM. Chaussat, Krause, Vallée, que cette courbure est habituellement ellipsoïdale, comme pour l'œil du bœuf. Il est, du reste, facile de reconnaître que la surface de la cornée n'est pas sphérique, en se regardant dans une glace et observant l'image d'une fenêtre, sur la cornée ; en se tournant peu à peu, de manière que cette image change de place, on la voit grandir sensiblement en s'approchant du bord de la prunelle. Nous verrons aussi que cette surface n'est pas de révolution (2154).

Les surfaces du cristallin ont aussi des formes d'ellipsoïde, à peu près de révolution, mais autour du petit axe, comme Chaussat l'a constaté au moyen du mégascope, sur l'œil du bœuf. Le cristallin était plongé dans l'eau et reposait sur du mercure pour éviter toute déformation ; il absorbe l'eau assez rapidement, mais on avait soin de se mettre en garde contre cette cause d'erreur.

Outre la forme de la cornée, il est une autre circonstance qui concourt à diminuer l'aberration de sphéricité pour les rayons obliques. M. Vallée a reconnu, par l'expérience, que les axes secondaires correspondant aux différents points d'un objet, ne se coupent pas en un seul centre optique, mais qu'ils se coupent deux à deux, en formant une petite surface placée derrière le cristallin. L'espace occupé par cette surface est très petit, et peut être considéré comme un point, quand on construit géométriquement l'image formée au fond de l'œil.

Champ de la vision nette. — Le champ de la vision nette est extrêmement restreint. Car, si l'on regarde la première lettre d'un mot imprimé en caractères ordinaires, comme ceux de cette page, par exemple, on ne distinguera pas les dernières lettres du mot, et l'on ne pourra en deviner la fin sans déplacer l'œil. Quand la page est à 30 centimètres de l'œil, on ne peut distinguer que les lettres qui ne s'éloignent pas de plus de 10 à 15^{mm} de celle que l'on regarde directement. D'après Hyoung, le diamètre du champ de la vision nette n'est pas de plus de 2° à 4°. Si nous pouvons voir *nettement* toutes les parties d'un corps assez grand, c'est que, comme l'avait remarqué Ptolémée, l'axe de l'œil se déplace avec une très grande vivacité, et se dirige très rapidement sur les différents points du corps, de manière qu'on a la perception presque simultanée de ses différentes parties.

2142. Vision nette et vision distincte. — On a souvent établi une différence entre la vision *nette* et la vision *distincte*, entre la vision de détails et la vision d'ensemble. La vision est nette quand on distingue les petits détails des objets ; mais la limite est difficile à préciser, et il y a de grandes différences d'un individu à un autre. Dans tous les cas, la vision nette a toujours

une limite, puisque l'œil, aidé du microscope, peut distinguer des détails de plus en plus déliés, à mesure que l'instrument grossit davantage. Cette limite provient, soit de ce que l'impression produite en un point de la rétine s'étend un peu tout autour de ce point, par une sorte de communication que nous étudierons plus loin, soit parce que l'aberration de sphéricité n'est pas complètement nulle. Quelle qu'en soit la cause, il existe sur la rétine, autour de l'image focale d'un point, un petit cercle impressionné, que Jurin a nommé *cercle de dissipation*. Si les détails de l'objet forment des images plus rapprochées que l'étendue des cercles de dissipation, ces images se superposent, se troublent mutuellement, et on ne peut les discerner. La netteté dépend donc de l'espace occupé sur la rétine par les images des différents points de l'objet, c'est-à-dire du diamètre apparent qui leur correspond. Par exemple, on pourra distinguer les détails d'un monument, sur une photographie d'assez grande dimension, tandis que ces détails ne pourront se voir sur une photographie beaucoup plus petite, quoiqu'ils y soient représentés, comme on peut s'en assurer au moyen d'une loupe. La vision peut être considérée comme nette quand on ne distingue pas de diffusion sur la ligne de séparation de deux surfaces de teinte différente, ou sur les bords des traits fins et déliés. La limite de détails à laquelle s'arrête la vision, est aussi déterminée par les dimensions des extrémités des fibrilles de la rétine (*cones, batonnets*). Ces extrémités ont une certaine dimension ; leur diamètre, d'après M. Kœlliker, varie de $0^{mm},0005$ à $0^{mm},0045$. Toute image d'un diamètre moindre produira donc la même sensation qu'un point unique, et ne pourra être distinguée.

2143. De l'achromatisme et du chromatisme de l'œil. — L'œil est achromatique lors de la vision nette ; car les objets vus directement ne sont pas irisés sur leur contour. On a admis pendant longtemps, en partant de l'idée préconçue que l'œil devait être un organe parfait, que cet achromatisme était vrai d'une manière absolue, et l'on a cherché à l'expliquer par la réunion de plusieurs masses lenticulaires formées par les différentes humeurs de l'œil et par les couches superposées du cristallin. Mais, depuis les expériences de MM. Wollaston, Young, Muller, Plateau, Matthiessen..., on est forcé d'admettre que les rayons de différentes couleurs font leur foyer à des distances différentes du cristallin. Si les images des objets vus nettement ne sont pas irisées sur les bords, cela tient à ce que les rayons fort peu divergents qui passent par la pupille, n'étant que très peu déviés, et la distance focale étant très petite, la dispersion est insensible.

Voici les expériences les plus frappantes qui prouvent le *chromatisme* de l'œil : 1° Si, comme l'a fait Wollaston, on regarde un point lumineux à travers un prisme; par exemple, une étoile, on aperçoit un spectre très étroit, qui devrait avoir partout la même largeur, si le foyer de chaque couleur se faisait à la même distance. Or, si l'on regarde l'extrémité rouge, la partie violette

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXIV, p. 875.

paraît élargie en éventail, ce qui prouve que les rayons violets ne font pas leur foyer sur la rétine ; si, au contraire, on regarde l'extrémité violette, la partie rouge paraît étalée à son tour ; il est impossible de voir le spectre, linéaire dans toute son étendue. — 2° M. Plateau et M. Dove regardent une bougie à travers une lame de verre bleue-cobalt, qui laisse passer les rayons rouges, indigos et violets. A la distance de la vision nette, la flamme paraît uniformément violette ; mais si, sans modifier l'état de l'œil, on rapproche la flamme, le contour est rouge, et si on l'éloigne, le contour est violet et le milieu rouge. — 3° Ce n'est qu'à partir d'une certaine distance de l'œil que les objets sont vus sans trouble. Or, M. Matthiessen a constaté que la distance minimum, à laquelle doit être placée une division tracée sur une lame de verre pour être vue nettement, est plus grande quand elle est éclairée par derrière avec de la lumière rouge, que lorsqu'elle est éclairée par de la lumière indigo. Les distances peuvent être doubles l'une de l'autre quand on a la vue longue ; les différences, moins grandes pour les vues normales, sont peu sensibles pour les myopes.

Le chromatisme de l'œil explique pourquoi on éprouve une grande fatigue, une sorte d'éblouissement, quand on veut lire des lettres rouges sur un fond vert clair de même éclat ; c'est que l'œil cherche à voir nettement deux objets colorés qui ne peuvent former simultanément leur image focale sur la rétine. Si ce phénomène ne se produit pas toujours avec deux couleurs quelconques, c'est que, le plus souvent, l'une d'elles est plus éclatante que l'autre et attire particulièrement l'attention. M. Wheatstone a fait beaucoup d'observations sur des dessins verts et rouges couvrant entièrement une surface ; ces dessins semblent s'agiter quand on les regarde fixement, à cause des changements continuels d'état de l'œil cherchant à voir nettement les deux couleurs. D'autres nuances que le vert et le rouge produisent cet effet, mais moins prononcé. Cette expérience est connue sous le nom de *cœurs agités* de Wheatstone, les premières observations ayant été faites par hasard sur un tapis sur lequel étaient dessinés des cœurs.

Il résulte des expériences de Jurin, Scheiner, et de MM. Muller et Trouessart, que l'œil n'est plus achromatique pour les images confuses qui se font sur la rétine, quand on regarde au-delà ou en deçà de l'objet qui les produit. Quand on regarde avec un seul œil, un champ blanc sur un fond noir, en fixant son regard au-delà du plan de ce champ, on le voit bordé de couleurs, parmi lesquelles on distingue principalement le jaune et le bleu, le bleu en dedans. Le bleu est, au contraire, en dehors quand on s'arrange de manière à voir nettement des objets plus rapprochés que le champ.

III. Ajustement de l'œil. — Besicles.

2144. Portée de la vue. — Quand on a une bonne vue, on peut voir nettement, depuis 15 centimètres environ, jusqu'à une distance indéfinie. L'œil

est donc une chambre noire *à foyer variable* ; seulement il faut, pour qu'on puisse distinguer toujours avec la même netteté les détails des objets, *que leur diamètre apparent reste le même.* C'est ainsi qu'on peut lire les grosses lettres d'une affiche, d'une grande distance, et les caractères moins gros, d'une distance moindre. Si l'on s'approche très près, on distingue des inégalités sur le contour des lettres, et même le grain du papier.

Distance de la vision distincte. — Il y a une distance pour laquelle on voit, sinon plus nettement, du moins avec moins de fatigue, soit par suite de la structure de l'œil, soit par habitude. Cette distance est de 15 à 20cm pour les bonnes vues ; c'est celle à laquelle on place la page qu'on veut lire. On la nomme *distance de la vision distincte*, parce que certains yeux défectueux ne voient nettement qu'à une distance déterminée (2148).

La position des images de la chambre noire variant avec la distance des corps, on doit se demander comment il se fait que les images faites sur la rétine restent nettes pour différentes distances de l'objet. Remarquons que la question n'est à poser que pour les petites distances ; car nous savons que, pour les grandes, des déplacements considérables des objets ne font varier la position de l'image que de quantités insensibles (1987).

2145. L'œil s'accommode aux distances. — Deux opinions ont partagé les physiciens et les physiologistes ; dans l'une on admet que l'œil se modifie, change quelques-unes de ses conditions optiques ; en un mot, se *met au point*, pour voir nettement les objets placés à des distances différentes. Dans l'autre on suppose que l'œil ne se modifie pas, soit parce que les changements de place de l'image sont insensibles à cause des petites dimensions de l'œil, soit par suite de la marche particulière des rayons lumineux à travers les humeurs de cet organe.

La première opinion est seule admissible. En effet, si l'on regarde, même avec un seul œil, un objet rapproché, les objets éloignés placés dans la même direction, sont vus confusément. Réciproquement, si l'on regarde spécialement ces derniers, ceux qui sont plus rapprochés paraissent confus à leur tour. Si l'on regarde l'image *réelle* formée au foyer d'un miroir concave, en se plaçant au-delà de cette image, on éprouve une sorte d'éblouissement, qui provient de ce que l'attention étant attirée par le cadre du miroir, on cherche instinctivement à mettre l'œil dans l'état qui convient à la distance de ce cadre, en même temps que dans celui qui convient à celle de l'image. Les expériences de Wollaston sur le chromatisme de l'œil (2144) prouvent aussi que l'organe s'ajuste différemment pour les différentes couleurs. Remarquons encore que l'œil se fatigue quand on regarde longtemps à une distance déterminée ; par exemple, quand on lit. Si l'on cherche ensuite à voir des objets éloignés, au premier moment ils paraissent troubles ; l'œil éprouvant une certaine difficulté à changer un état dans lequel il est resté pendant longtemps ; de même qu'on éprouve une certaine peine à changer d'attitude quand on a conservé longtemps la même position.

L'ajustement de l'œil d'après la distance, est soumis à l'action de la volonté ; car si on laisse errer ses regards, sans intention de les fixer sur les objets environnants, l'œil prend un état de repos, dans lequel tous ces objets paraissent troubles ; mais aussitôt que l'on *veut*, l'œil fait un effort dont on a parfaitement conscience, et les objets que l'on regarde sont vus avec netteté. Si l'on place alors devant l'œil une lentille à très long foyer, on voit trouble ; mais, par un effort volontaire, on arrive à distinguer nettement, tout en éprouvant une fatigue qui finit par devenir douloureuse.

L'expérience suivante, due à Schneider, montre que les images de points différemment éloignés ne se font pas à la même distance du cristallin. On regarde un très petit objet à travers deux trous d'épingle α, β pratiqués dans une carte (*fig.* 1590), et séparés par un espace moindre que le diamètre de la pupille ; l'objet paraît double, si ce n'est quand il se trouve à une certaine distance. Ce résultat provient de ce que l'image focale allant se former au-delà ou en deçà de la rétine, les pinceaux qui passent par les deux trous et se croisent au foyer, rencontrent cette membrane en deux points différents. Par exemple, L étant le cristallin, si la rétine est en *r*, l'image du point *s* sera unique ; si elle est en *ab*, ou en *a'b'*, il y aura deux images *a*, *b*, ou *a'*, *b'*, formées par les pinceaux *sαaa'*, *sβbb'*. Si la rétine est en *ab*, et qu'on bouche le trou α, l'image qui est du même côté disparaîtra ; ce sera le contraire si la rétine est en *a'b'*. — Si l'œil ne se modifie pas de manière à faire coïncider les deux images *a*, *b* ; *a'b'*, cela vient simplement, comme le remarque Porterfield, de ce que les deux pinceaux, étant très minces, forment des images qui seraient suffisamment nettes, même sans l'intervention de la réfraction des humeurs de l'œil, comme cela a lieu dans la chambre noire *simple* : l'œil ne sent donc pas le besoin de s'adapter à la distance, et prend l'état qui lui est le plus habituel. Du reste, si les images des points d'un objet vu sans obstacle, devaient être accompagnées de cercles de dissipation de diamètre égal à la distance des images *a*, *b* ou *a'*, *b'*, cet objet ne se verrait que très confusément ; il faut donc que, en l'absence de la carte, l'œil se modifie pour faire disparaître ces cercles de dissipation.

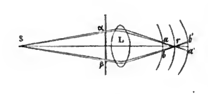


Fig 1590.

Les expériences précédentes sont si faciles à répéter et prouvent d'une manière si évidente que l'œil doit se modifier pour voir nettement à des distances différentes, qu'on se demande comment l'opinion contraire a pu avoir quelque crédit. Mais remarquons d'abord que les bonnes vues étant rares parmi les hommes d'étude, plus d'un observateur s'est trouvé dans de mauvaises conditions pour expérimenter sur ses propres yeux. On a aussi invoqué des expériences de Biot, Magendie, de Haldat, M. Vallée, qui ont trouvé que

les images formées au fond de l'œil de lapins albinos, ne changeaient pas de netteté quand les objets étaient placés à différentes distances. Mais Dugès, qui a répété ces expériences, remarque que l'image, vue à travers la sclérotique, qui n'est que translucide, ne paraît jamais nette ; ce serait donc le plus ou moins de netteté qu'il faudrait apprécier. D'un autre côté, une diffusion insensible dans la très petite image *vue* sur le fond de l'œil, peut être très appréciable quand cette image est *sentie* par la rétine, dont les fibres très divisées permettent de discerner les impressions de points lumineux extrêmement rapprochés les uns des autres.

Les systèmes par lesquels on a tenté d'expliquer la netteté de la vision à des distances très variables, tout en supposant que l'œil ne se modifie pas, ne peuvent donc être adoptés. Parmi ces systèmes, nous citerons celui de M. Lehot, qui suppose que le corps vitré est sensible et qu'il perçoit l'image à *trois dimensions* qui se forme dans sa masse. Mais alors l'œil n'aurait pas besoin de s'ajuster, et l'on ne concevrait pas les illusions que produisent les *dioramas*, et, en général, les peintres qui produisent le même effet que si les objets représentés étaient en relief. Sturm et M. Vallée ont aussi publié des théories très remarquables, au point de vue mathématique, de la vision nette à des distances variables sans modifications de l'œil. Le premier calcule, d'après les courbures des surfaces et les indices de réfraction des humeurs de l'œil, la marche des rayons dans cet organe, et il trouve que les rayons partis d'un point extérieur, forment une surface caustique qui enveloppe l'axe, puis se confond avec lui dans une certaine étendue, nommée *intervalle focal*, pour s'en séparer ensuite. Il suffirait que la rétine fût rencontrée par cet intervalle focal, pour que l'image fût nette.

2118. HYPOTHÈSES SUR L'AJUSTEMENT DE L'ŒIL. — Cherchons maintenant quelles sont les modifications qu'éprouve l'œil, quand il s'adapte aux distances. On a fait, à ce sujet, un grand nombre d'hypothèses.

1° Kepler, Boehrave, Rohaut, Olbers...., pensaient que le globe de l'œil s'allongeait pour voir les objets rapprochés ; et, tandis que Rohaut attribuait cet effet aux muscles obliques, et l'effet contraire aux muscles droits, Olbers, Home, Englefield, Ramsden, donnaient un rôle inverse à ces muscles. Mais les changements de longueur de l'œil ne pourraient avoir lieu sans modifications dans la courbure de la cornée, et nous allons voir que ces modifications n'existent pas. Du reste, la question est tranchée par une observation de Græfe, qui a vu un homme dont les muscles des yeux étaient paralysés, continuer à distinguer nettement aux différentes distances.

2° Kepler admettait aussi que le cristallin pouvait se déplacer, sollicité par la couronne ciliaire, de manière à se rapprocher ou à s'éloigner de la rétine. Ces mouvements, admis par Schneider, Plumbius, Jurin, Poterfield, Zinn, Camper,....., ne peuvent avoir lieu sans refoulement des humeurs de l'œil, et, par conséquent, sans changements de courbure de la cornée.

3° Jurin, Mile, Musschenbroek, etc., admettaient des changements de courbure dans la cornée, combinés avec les variations de grandeur de la pupille. Mais des expériences faites par Hyoung, Dugès, de Haldat, Crumer et MM. Senff et Helmboltz ont prouvé que de semblables changements de courbure n'existent pas. La tête de l'individu étant bien fixe, Hyoung mesurait, avec un micromètre adapté à une lunette, la distance des images de deux bougies réfléchies par la surface de la cornée, pendant que l'individu regardait successivement des objets rapprochés et éloignés, placés dans la même direction ; cette distance restait constante. Enfin, Young a pu voir nettement des objets situés à des distances différentes, à travers un tube métallique plein d'eau, liquide dont l'indice de réfraction diffère à peine de celui de l'humeur aqueuse, et dans lequel la cornée était plongée, ce qui annulait l'influence de sa courbure.

4° Une hypothèse qui a été longtemps en faveur est celle qui attribue l'ajustement de l'œil aux variations de la pupille, combinées avec la structure du cristallin. Lahire, Leroy, Haller, Sabbatier, Tréviranus, etc., et en dernier lieu M. Pouillet, ont adopté et développé cette hypothèse. Tréviranus l'a soutenue par des considérations mathématiques, et il a cherché à démontrer que le cristallin, composé de couches de densités différentes, donne des images placées à une distance constante, quand on intercepte les rayons qui passent près des bords, en proportion d'autant plus grande que les objets sont plus rapprochés. M. Pouillet, après avoir remarqué que les couches du cristallin diffèrent, non seulement en densité, mais encore en courbure et en épaisseur, considère cet organe comme une lentille ayant un grand nombre de foyers différents ; les plus rapprochés formés par les rayons qui passent près du centre, et les plus éloignés par ceux qui passent près des bords. Lorsqu'on regarde un point rapproché, dont l'image tend à se faire derrière la rétine, la pupille se contracte, et les rayons passant par les parties les plus réfringentes du cristallin, vont faire leur foyer sur la rétine. Quand, au contraire, on regarde un point éloigné, le foyer tend à se faire en avant de la rétine ; mais alors la pupille se dilate, et les rayons qui traversent le cristallin près du contour, dans les parties les moins réfringentes, vont faire leur foyer plus loin, sur la rétine. Quant aux rayons qui passent près de l'axe, ils donnent un foyer situé en avant de cette membrane ; mais comme ils sont moins nombreux que ceux qui passent près du contour, ils ne font que jeter sur l'image une lueur diffuse qui ne peut que diminuer son éclat sans nuire à sa netteté.

Dugès oppose à cette théorie, des expériences qui prouvent que la vision à différentes distances ne dépend pas absolument de la grandeur de la pupille. Par exemple, on voit nettement avec la pupille très étroite, les objets éloignés, quand ils sont très éclatants ; et avec la pupille très large, les objets rapprochés, quand ils sont très sombres. Vient-on à regarder au loin un objet brillant, et à reporter brusquement ses regards sur un objet sombre rapproché, on peut voir, au moyen d'une glace, la pupille s'agrandir. On devrait aussi être myope au grand jour et presbyte le soir, puisqu'une vive lumière détermine le



rétrécissement de la pupille, et chacun sait combien il est facile de voir à de grandes distances pendant les journées les plus éclatantes de l'été.

5° Tous les systèmes qui précèdent étant exclus, il ne reste plus à développer que celui dans lequel on considère le cristallin comme une lentille vivante pouvant changer de foyer suivant la distance des objets.

2147. Rôle du cristallin pendant l'adaptation de l'œil aux distances. — Descartes, Sauvage, Bourdelot, ont, les premiers, cherché dans des modifications du cristallin l'explication de l'adaptation de l'œil aux distances, Home, Pemberton, Albinus, Hunter, ont adopté la même opinion, qui a été reprise et développée par Hyoung, dans un long et remarquable mémoire [1], puis confirmée par les recherches d'Arago, de Dugès, etc.

Pour prouver que le cristallin est susceptible de changer de forme ou de densité, on a commencé par montrer que, malgré sa nature toute spéciale et sa transparence parfaite, il n'est pas un simple produit de sécrétion, mais qu'il est organisé et vivant. Dugès ayant déchiré le cristallin d'un lapin vivant, en ménageant autant que possible la capsule cristalline, l'a vu se cicatriser en quelques semaines. Zinn a vu une injection pénétrer par deux ramuscules dans le cristallin d'un veau; il y a donc des vaisseaux comme dans toutes les parties vivantes. De plus, il a signalé l'existence d'une petite artère transparente, venant du fond de l'œil, et aboutissant au centre de la face postérieure du cristallin, aprés avoir traversé le corps vitré.

Voyons maintenant si la structure du cristallin peut se prêter à des changements de forme ou de densité. Hyoung a montré, à l'aide d'observations directes, que cet organe est formé de fibres transparentes entrelacées, comme Hunter l'avait déjà observé de son côté. Longtemps auparavant, Leuwenhock suivait et dessinait ces fibres dans l'œil d'un poisson. Pour bien voir la structure du cristallin, il faut le faire macérer pendant longtemps dans de l'acide nitrique chaud; ce qui le rend blanc à l'extérieur et d'un jaune clair à l'intérieur. Les fibres sont alors très distinctes, peuvent se séparer facilement, et ressemblent à de la soie écrue. D'après Berzélius, elles sont composées d'une matière semblable à celle que donne l'albumine et la fibrine soumises aussi à l'action de l'acide nitrique.

L'arrangement de ces fibres est assez compliqué et en même temps très régulier. Dugès a reconnu qu'elles forment plusieurs couches superposées [2]. La couche extérieure présente seize sutures rayonnantes, visibles à la loupe aprés un commencement de coagulation par l'alcool, et formées par la réunion de fibrilles se rencontrant très obliquement, comme on le voit en D (*fig.* 1589). Ces sutures ne se correspondent pas sur les deux faces de la lentille, elles alternent, et chaque fibrille passe d'une face à l'autre, en se ployant sur le bord de la lentille et se contournant un peu en forme d'S. De plus, celles qui

[1] *Trans. phil.* (1801), 1re part.; et *Bibl. univ. de Genève* (Sc. et arts), t. XVIII, p. 225.
[2] *Traité de physiologie comparée*, t. I, p. 261.

commencent près du centre sur une des faces, se terminent près du contour sur l'autre face, et réciproquement. Les couches intérieures sont organisées de la même manière ; seulement les sutures paraissent diminuer de nombre ; près du centre on n'en compte plus que trois. Chez le bœuf et le mouton le cristallin n'a que trois sutures sur chaque face; chez le lapin il n'en présente qu'une seule.

La structure fibreuse du cristallin a conduit à le regarder comme un muscle. L'assimilation est confirmée par plusieurs considérations : les fibrilles du cristallin ressemblent beaucoup aux fibres rayonnantes de l'iris; comme ces dernières, elles sont linéaires ou moniliformes. Berzélius n'a trouvé que des différences douteuses entre leur composition et celle des fibres musculaires. Coagulées par l'alcool ou par la chaleur, elles ressemblent étonnamment à la chair des poissons. Enfin, le cristallin est imbibé d'un liquide qui, soumis à l'action de la chaleur, se prend en une masse grenue, comme le caillot du sang, dont elle ne se distingue que par l'absence de couleur. Ce liquide semble donc être du sang incolore, destiné à former un tissu fibreux également incolore.

On voit que la structure et la composition chimique du cristallin autorisent à le regarder comme susceptible d'éprouver des contractions qui en changent la forme ou la densité, et par conséquent la distance focale. Ces contractions qui se font sous l'influence de la volonté, par l'effort que l'on fait pour distinguer nettement les objets, suffisent pour expliquer l'adaptation de l'œil. Voici quelques faits qui viennent confirmer cette théorie : 1° Les individus affectés de la *cataracte*, c'est-à-dire, dont le cristallin est devenu opaque, et auxquels on rend la vue en enlevant ce corps, ne peuvent voir nettement à différentes distances, quoiqu'on ait dit le contraire. On supplée à l'absence du cristallin par une lentille convergente placée devant l'œil, mais la vision n'est bien nette qu'à une distance déterminée, qui dépend du foyer de cette lentille. 2° L'habitude de regarder de très près finit par rendre *myope*, comme cela arrive souvent aux horlogers, aux graveurs ; le cristallin acquiert alors une convexité trop grande et permanente, ce qui prouve qu'il devient plus convexe quand on regarde des objets très rapprochés.

Les seules objections que l'on ait faites à la théorie que nous venons d'exposer, portent sur des faits négatifs. Ainsi on a invoqué l'inutilité des essais que l'on a faits pour exciter des mouvements dans le cristallin, au moyen de l'électricité ; mais il peut arriver que l'irritabilité de ces sortes de fibres cesse presque immédiatement après la mort ; les contractions lentes de l'iris (1996) nous avertissent, d'ailleurs, que nous ne devons pas nous attendre à trouver dans les fibres transparentes des organes de l'œil les mêmes propriétés que dans les fibres des muscles proprement dits. Cependant, pour lever tous les doutes, il restait à montrer directement les modifications du cristallin.

Observation des changements du cristallin. — Ribes avait remarqué que, lorsqu'on regarde un objet très rapproché, l'iris est poussé en avant ;



mais ce mouvement pouvait être attribué au déplacement du cristallin, aussi bien qu'à un accroissement de convexité. Enfin, dernièrement, deux physiologistes, M. Cramer, en Hollande, et M. Helmholtz, en Allemagne, ont, chacun de leur côté, montré les changements de courbures du cristallin[1]. Voici comment se fait l'expérience. On approche une bougie, de l'œil d'une personne placée dans une chambre obscure et à laquelle on fait regarder un objet éloigné. On voit dans son œil trois images : l'image antérieure est droite, virtuelle et formée par la cornée; l'image postérieure, droite aussi, se fait par réflexion sur la surface antérieure du cristallin; l'image moyenne, plus petite et *renversée*, est réelle; elle est produite par la surface postérieure du cristallin, agissant comme miroir concave. Ces images avaient été signalées par Sanson et Purkinge. On les observe avec une loupe placée au fond d'un tube; la loupe doit être placée successivement à des distances différentes, pour voir nettement les trois images. Si l'on fait regarder à la personne en expérience un objet rapproché, tout à coup on voit l'image postérieure s'avancer vers la première, qui ne change pas de position, ce qui indique que la surface antérieure du cristallin est devenue plus convexe. En même temps, l'image postérieure est plus vive et M. Helmholtz a reconnu par des mesures précises qu'elle a diminué. L'image moyenne ne semble pas changer de place; mais comme elle devient plus vive et plus petite, on doit en conclure que la face postérieure du cristallin devient aussi plus convexe.

Ces expériences remarquables lèvent tous les doutes, et l'on peut aujourd'hui regarder comme bien démontré que : 1° l'œil s'ajuste d'après les distances; 2° la principale modification qu'il éprouve alors consiste dans les changements de forme du cristallin.

2148. DÉFAUTS DE LA VUE. — Nous avons dit que l'on peut distinguer nettement depuis 15 à 20cm, jusqu'à une distance indéfinie. Mais cela n'a lieu que pour les vues bonnes et flexibles. Il n'en est pas de même des yeux affectés du *presbytisme* et de la *myopie*, défauts très fréquents de la vue.

Presbytisme. — Chez les *presbytes*, l'image tend à se faire derrière la rétine, et le minimum de distance de la vision nette est beaucoup augmenté; on dit qu'ils ont la *vue longue*. Le plus souvent ils peuvent voir nettement à toute distance plus grande que cette limite, quand il n'y a pas d'autre vice congénère, comme l'affaiblissement de sensibilité de la rétine, le défaut de transparence de la cornée ou des humeurs de l'œil. Le presbytisme se rencontre surtout chez les vieillards; il est dû à la diminution d'épaisseur du cristallin, qui perd de sa substance sous l'influence de l'âge, comme cela a lieu pour tous les muscles, au défaut de flexibilité de cet organe, qui ne peut plus s'adapter aux petites distances, pour lesquelles l'œil doit se modifier beaucoup plus que pour les distances moyennes. Il peut se faire enfin que l'aplatissement du fond de l'œil rapproche la rétine du cristallin.

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc. phys.), t. I (1858), p. 71.

Myopie. — La *myopie* présente de nombreuses variétés. Tantôt la vision nette n'a lieu qu'à une seule distance, qui est très petite, ce qui indique un manque complet de flexibilité de l'œil ; tantôt elle peut avoir lieu entre certaines limites plus ou moins resserrées, de manière qu'elle est confuse à de grandes distances. Chez les myopes, l'image tend à se former en avant de la rétine. Ce défaut peut provenir de la conformation vicieuse de l'œil, et il est alors souvent héréditaire : le cristallin peut être trop convexe, l'œil trop gros, ce qui fait que la rétine est trop éloignée du cristallin ; la cornée peut être trop convexe, quelquefois elle est presque conique, et alors, le plus souvent, on ne voit nettement qu'à une seule distance. La myopie peut aussi s'acquérir par l'habitude de regarder de très près de petits objets, par l'usage fréquent de la loupe ou du microscope, par l'abus de la lecture. Ware a trouvé 32 myopes parmi 127 étudiants ; tandis qu'il n'en a trouvé que 3 parmi 1,300 enfants. Dans les observations faites par Holke sur 14,065 personnes, les hommes ont fourni, entre 16 et 60 ans, 39 pour cent de myopes, et les femmes



Fig. 1591. Fig. 1592.

18 pour cent ; de 60 à 90 ans, il ne s'est plus trouvé que 13 pour cent d'hommes myopes et 9 pour cent de femmes. Les savants ont donné la proportion énorme de 73,52 myopes de 16 à 60 ans, et 29,21 de 60 à 90, tandis que les artisans n'en ont présenté, à tout âge, que de 8 à 10 pour cent. La myopie est très rare dans les campagnes. Tous les voyageurs sont d'accord pour attester qu'ils n'en ont pas trouvé de cas chez les sauvages, les peuples nomades, comme les Tartares, les Arabes, etc. On a vu cette affection disparaître peu à peu pendant des voyages dans des pays à vastes horizons, où l'œil devait continuellement regarder au loin.

2149. Besicles. — Pour suppléer aux imperfections de la vue, on se sert de lentilles à très longs foyers, nommées *besicles* ou *lunettes*.

Les *presbytes*, qui ne peuvent voir qu'à des distances trop grandes pour lire commodément, placent devant leurs yeux des lentilles convergentes à très long foyer, qui donnent aux rayons partant d'objets rapprochés le même degré de *divergence* que s'ils partaient d'une plus grande distance. On peut calculer la distance focale f que doit avoir la lentille pour qu'on puisse lire à une distance d *plus petite que* f, quand on connaît la distance de la vision nette d'. En effet, soit s (*fig.* 1591) le point lumineux, et négligeons la distance de la lentille à l'œil. Cette lentille devra être telle que les rayons partant de s aient le même degré de *divergence* que s'ils partaient de s' situé à la distance de la vision distincte. Le point s' est donc le foyer conjugué *virtuel* du point s, et l'on aura

$$\frac{1}{d}-\frac{1}{d'}=\frac{1}{f}, \qquad \text{d'où } f=\frac{dd'}{d'-d}.$$

Les *myopes* se servent de verres divergents. Soit s (*fig.* 1592) le point lumineux, et s' la position très rapprochée qu'il devrait avoir pour que la vision fût nette. La lentille divergente devra être telle que les rayons partant du point s divergent en émergeant, comme s'ils venaient de s'. s et s' sont, donc des foyers conjugués, et l'on aura pour déterminer le foyer f de la lentille, $\frac{1}{d}-\frac{1}{d'}=-\frac{1}{f}$, d'où $f=\frac{dd'}{d-d'}$. Tantôt le myope armé de ses besicles voit comme s'il avait bonne vue ; l'œil ayant conservé sa flexibilité ; tantôt il y a un maximum de distance au-delà duquel la vision est confuse, seulement le maximum et le minimum de distance sont augmentés et diffèrent davantage l'un de l'autre ; tantôt enfin la vision continue à n'avoir lieu qu'à une distance déterminée ; seulement cette distance est plus grande que sans verres ; alors l'œil a perdu toute sa flexibilité.

Verres périscopiques. — On ne voit bien, avec des besicles, que dans la direction de l'axe des lentilles ; quand on regarde obliquement, les rayons éprouvent une grande aberration de sphéricité, et l'image focale virtuelle est trouble. Wollaston a obvié à cet inconvénient au moyen de verres qu'il nomme *périscopiques*. Ce sont des ménisques convergents ou divergents, dont la face concave est tournée du côté de l'œil, de manière que les pinceaux de rayons obliques à l'axe principal tombent à peu près normalement à la surface convexe.



Fig. 1593.

Œil artificiel. — On trouve dans les cabinets de physique un petit appareil destiné à vérifier les effets des lentilles sur la distance de la vision nette. Il consiste en une chambre noire globulaire *el* (*fig.* 1593), dont le fond *e* en verre dépoli, peut se rapprocher plus ou moins de la lentille *l*. Après avoir placé le fond de manière que l'image d'un objet s'y fasse nettement, on amène devant la lentille, le verre convergent *c*, et l'on reconnaît qu'il faut rapprocher l'objet pour qu'il continue à former une image nette, et l'éloigner quand on remplace le verre convergent par un verre divergent *d*.

2150. On ne sait pas au juste à qui il faut attribuer l'invention des besicles, sans lesquelles une foule de personnes seraient en partie privées de l'usage de leurs yeux. On a dit que Roger Bacon les connaissait ; mais les textes sur lesquels on s'est appuyé sont loin d'être concluants. Tout ce qu'on peut dire, c'est que cette précieuse invention remonte à la fin du XIII[e] siècle. En effet, le médecin italien Rédi cite un manuscrit de 1299, dont l'auteur dit ne pouvoir plus lire « sans ces verres, qu'on a inventés nouvellement, au grand avantage des pauvres vieillards. » Le dictionnaire *Della Crusca* cite au

mot *occhiali* (besicles) un sermon prononcé en 1305, dans lequel il est dit que cette invention ne date que de vingt ans à peine. Quant au nom de l'inventeur, on ne le connaît pas. Montucla cite bien une inscription d'un tombeau de Sainte-Marie-Majeure de Florence, indiquant qu'il renfermait les restes d'un banquier, Salvino degli Armati, *inventeur des besicles*, mort en 1317 ; mais peut-on bien se fier à une épitaphe, qui n'existe même plus ? Ce qui paraît plus certain, c'est que la découverte, qui avait d'abord été tenue secrète, a été divulguée par le P. A. Spina. Il est à remarquer que dans tous les écrits où il est question des besicles, on ne parle que des presbytes. Il paraîtrait donc qu'on ne serait venu que plus tard au secours des myopes, au moyen des verres divergents. Il est vrai que Pline parle d'émeraudes *concaves*, à travers lesquelles Néron regardait les combats des gladiateurs ; mais, comme on attribuait les propriétés de ces émeraudes à leur substance et non à leur forme, ainsi que l'atteste la défense faite aux graveurs d'employer des émeraudes concaves, on ne peut regarder les anciens comme ayant connu l'usage des lentilles pour aider la vue, d'autant plus qu'ils croyaient que ces émeraudes convenaient indifféremment à tous les yeux.

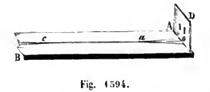


Fig. 1594.

2151. Optomètres. — P. Artefield, Hyoung, Mile, Lehot, ont imaginé des instruments nommés *optomètres* ou *opsiomètres*, destinés à mesurer les limites de la vision distincte des différents yeux. La *fig.* 1594 représente l'optomètre le plus simple. AB est une règle horizontale de 1 mètre de longueur, sur laquelle est tracée une raie fine longitudinale, noire sur fond blanc, ou blanche sur fond noir. En AD, est un écran percé de deux fentes étroites verticales, dont la distance est moindre que le diamètre de la pupille. On regarde la raie à travers ces fentes, en appliquant l'œil tout près de l'écran. Les rayons envoyés par les points de la raie les plus rapprochés de l'écran, allant faire leur foyer derrière la rétine, les pinceaux qui passent par les deux fentes rencontrent cette membrane en des points différents, et la raie paraît double. La séparation des deux images va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de l'écran, puis ces images se confondent à une distance *oa*, qui est la limite inférieure de la vision nette. Pour certaines vues, la raie se dédouble de nouveau à une certaine distance *oc*, qui représente la limite maximum de la vision distincte, et l'espace *ac* donne le champ de la vision. Il y a certains myopes pour lesquels cette distance se réduit à un point ; ce sont ceux dont l'œil a perdu toute sa flexibilité. Pour les bonnes vues, et pour la plupart des presbytes, la raie ne se sépare pas une seconde fois, et reste simple à toute distance à partir du point *a*. — Au lieu de deux fentes, on peut n'en employer qu'une seule, moins large que le diamètre de la pupille ; alors la raie paraît trouble et épanouie en deçà du point *a* et au-delà du point *c*.

Optomètre d'Hyoung. — AB (*fig.* 1595) est un tube composé de deux parties pouvant s'enfoncer l'une dans l'autre ; à l'extrémité A est un disque *a* percé de deux fentes auxquelles on applique l'œil ; en B est un disque *b* présentant une fente unique fermée par un verre dépoli que l'on tourne vers la lumière. Tant que la fente *b* paraît simple, pendant qu'on enfonce plus ou moins les deux tubes l'un dans l'autre, la distance AB est comprise dans le champ de la vision distincte ; et dès que l'image commence à paraître double, cette distance a atteint une des limites. — Hyoung avait calculé des tables au moyen desquelles chacun pouvait, en partant des résultats donnés par l'optomètre, trouver immédiatement le verre convenable à sa vue.

Résultats. — Si l'on éclaire la raie ou la fente de l'optomètre d'Hyoung, avec de la lumière colorée, on trouve que la limite inférieure n'est pas la même pour toutes les couleurs ; nouvelle preuve du *chromatisme* de l'œil (2143).

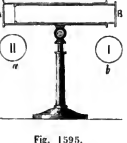


Fig. 1595.

Quand on place les deux fentes *a* l'une au-dessus de l'autre, on trouve que le point de séparation des images ne correspond pas généralement à la même distance des disques A et B. D'où l'on doit conclure que les surfaces de l'œil ne sont pas des surfaces de révolution. C'est du reste ce que M. Plateau a prouvé directement au moyen des expériences suivantes : on regarde à une distance d'une vingtaine de pas, une croix noire dont un des bras est vertical, et l'on remarque que ce bras paraît trouble pendant que l'autre est vu nettement, ou réciproquement, suivant les individus. Si l'on incline la tête de manière que la ligne des yeux soit verticale, c'est le bras qui paraissait net qui est vu trouble, et réciproquement. Si l'inclinaison est de 45°, les deux bras paraissent également nets. Si l'on remplace la croix par un anneau, cet anneau paraît plus épais aux extrémités du diamètre horizontal ou du diamètre vertical. Les hachures rectangulaires d'une gravure étant placées verticalement et horizontalement, les premières disparaissent avant les autres, ou réciproquement, quand on s'éloigne peu à peu.

IV. Phénomènes relatifs à la sensibilité de la rétine.

2152. De la sensibilité de la rétine. — La sensibilité de la rétine est spéciale pour la lumière : on peut pincer, déchirer cette membrane, comme l'a fait Magendie sur des animaux vivants, et même sur l'homme quand il introduisait des aiguilles dans l'œil pour l'opération de la cataracte, sans qu'ils paraissent s'en apercevoir. Certaines actions mécaniques peuvent néanmoins communiquer aux fibres de la rétine le même mode d'ébranlement que la

lumière, et alors on peut voir des lueurs dans l'obscurité. C'est ainsi qu'un coup sur l'œil, ou la secousse produite quand on éternue, font apercevoir comme un éclair qui passe à travers l'organe. — La simple pression d'un corps étroit détermine l'apparition d'une image brillante dont la forme rappelle celle du corps comprimant, et qui est placée à l'opposé du point comprimé, sur une droite qui passe par le centre optique du cristallin. Les images ainsi formées, nommées *phosphènes*, ont été utilisées par M. Serre, d'Uzés, pour étudier l'état pathologique des divers points de la rétine.

La rétine échappe en grande partie à l'action de la chaleur qui accompagne le plus souvent la lumière. Les rayons obscurs sont absorbés par les humeurs de l'œil, particuliérement par l'humeur aqueuse, qui, comme l'eau, est athermane pour ces sortes de rayons (11,733); ce qui, du reste, a été constaté directement par M. Janssen. Les rayons chimiques obscurs paraissent aussi être, au moins en partie, interceptés. Pour le prouver, il suffirait de montrer que certains milieux de l'œil deviennent *fluorescents* sous l'influence de ces rayons (2087). Or, M. J. Regnauld a annoncé que la cornée, l'hyaloïde et le cristallin sont fluorescents; il explique aussi par la grande quantité de rayons chimiques qu'elle contient, l'action dangereuse de la lumière électrique sur les yeux.

Pour que la lumière impressionne la rétine, il faut qu'elle ait une intensité suffisante. On admet généralement qu'il suffit que cette intensité soit environ $\frac{1}{90000}$ de celle des rayons de la lune. Cette limite est très vague; elle varie beaucoup d'un individu à un autre, et, pour le même individu, avec l'état de la rétine, suivant qu'elle sort du repos, ou qu'elle vient d'être excitée. Par exemple, quand on a passé plusieurs jours dans une obscurité complète, comme l'ont fait Lavoisier et d'autres physiciens pour se préparer à des recherches de photométrie, la rétine acquiert une sensibilité extrême. Une vive lumière émousse, au contraire, cette sensibilité. C'est ainsi qu'on ne distingue rien, au premier moment, quand on passe du grand jour dans un endroit sombre; ce n'est que peu à peu que la rétine retrouve assez de sensibilité pour qu'on puisse distinguer les objets faiblement éclairés.

Si une lumière trop faible n'agit pas sur la rétine, une lumière trop vive empêche aussi de rien distinguer : on dit qu'on est ébloui; alors la pupille se resserre fortement, pour arrêter le plus possible de rayons. C'est ce qui arrive quand, sortant d'un endroit sombre, où la rétine a éprouvé un repos relatif qui a exalté sa sensibilité, on passe brusquement au grand jour.

Point sensible. — Nous avons vu que l'image n'est bien nette que dans un espace très petit autour de l'axe de l'œil. Cet espace se nomme *point sensible*. Ce n'est pas là pourtant que la sensibilité est la plus grande. L'usage continuel de cette partie de la rétine en émousse la sensibilité. C'est pourquoi, quand on veut distinguer un objet peu éclatant, comme une comète à peine visible, une nébuleuse, une étoile très faible, il faut regarder à côté, de manière que l'image se projette à une certaine distance de l'axe, en des points où la sensibilité est

moins émoussée. On peut alors sentir la faible lumière de l'objet, mais on n'en distingue que confusément la forme.

2153. Punctum cæcum. — Il y a un petit espace de la rétine, sur lequel la lumière n'agit que très faiblement. Cet espace n'est autre chose que l'extrémité du nerf optique, au point où il pénètre dans l'œil. On le nomme *punctum cæcum*. Mariotte, qui l'a découvert, en démontrait l'existence par l'expérience suivante : on trace sur un plan, deux points *n*, *n'* (*fig.* 1596) situés à une distance de 10^{cm} environ l'un de l'autre; puis, fermant un œil, on place l'autre sur la perpendiculaire *no*, de manière que la ligne des yeux soit parallèle à *nn'*. Rapprochant ou éloignant ensuite l'œil peu à peu, tout en le maintenant sur la perpendiculaire *no*, quand on arrive à une distance de 25 à 30^{cm}, on voit le point *n'* disparaître subitement. C'est que l'image *a'* de ce point se déplace sur le fond de l'œil A, en s'écartant de l'image fixe *a* formée par le point *n*, et finit par tomber en *b'* sur l'extrémité du nerf optique. L'image du point *n'* reparaît dès que l'œil se rapproche ou s'éloigne de *nn'*. Mariotte avait conclu de là que, le nerf optique n'étant pas sensible à la lumière, la partie impressionnable de l'œil n'était pas la rétine, mais la choroïde. Aujourd'hui, l'insensibilité du nerf optique n'a rien qui étonne ; car on sait que les nerfs ne sont très sensibles que là où ils sont très divisés.

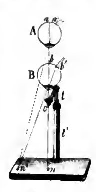


Fig. 1596.

2154. Sensibilité pour des impressions superposées. — Quand deux impressions se superposent sur la rétine, la plus faible disparaît devant la plus forte, quand la dernière est 64 fois plus forte que la première; car, comme nous l'avons vu, une ombre portée sur une surface éclairée ne se distingue plus, quand son éclat ne diffère que de $\frac{1}{64}$ de celui de la surface. La lumière 64 fois plus faible ne peut donc ajouter un éclat sensible autour de l'ombre qu'elle porte sur la surface. Cependant, quand on fait mouvoir l'ombre, son image se déplace sur la rétine et devient alors sensible (1889).

Visibilité des étoiles. — On ne voit pas les étoiles pendant le jour, parce que l'éclat de l'atmosphère est au moins 64 fois plus grand que celui de ces astres. Mais un fait qui paraît bien établi, c'est qu'on peut distinguer certaines étoiles en plein jour, quand on est au fond d'un puits très profond. Ce fait curieux, cité par Aristote, admis par Scheiner et J. Herschel, ne paraît pas facile à expliquer ; car chaque point de la rétine ne reçoit, dans tous les cas, que les rayons qui viennent des points de l'atmosphère situés sur l'axe optique qui lui correspond. Pour en rendre compte, Arago admet que la rétine reçoit de la lumière diffusée par l'œil lui-même. Or, quand on regarde à travers un tube, la quantité de lumière ainsi diffusée est d'autant plus petite que l'espace visible de la voûte céleste est plus étroit; l'éclat de l'étoile peut donc alors se trouver plus grand que $\frac{1}{64}$ de la lumière *totale* que reçoit la rétine. Quant à la cause de la diffusion, Arago l'attribue à des stries ou autres inégalités de la cornée; nous

verrons qu'elle peut s'expliquer, en outre, par l'existence de corpuscules disséminés dans les humeurs de l'œil.

2155. Irradiation. — Quand on regarde d'une certaine distance, un corps très brillant, il semble empiéter sur le fond plus sombre qui l'entoure, de manière à paraître plus grand qu'il n'est réellement. Pour le prouver, il suffit de dessiner un rond blanc sur un fond noir, et un rond noir de même dimension sur un fond blanc, d'exposer le tout au soleil, et de le regarder d'une distance de 2 ou 3 mètres; le disque blanc paraît plus grand que le noir. Si même ce dernier est très petit, le fond blanc, en empiétant sur lui, le fera disparaître à une certaine distance. — Si l'on place devant une bougie un écran noir qui la cache à moitié, le bord de l'écran paraît échancré à l'endroit où il coupe la flamme. — Quand la lune, dans son premier octant, ne montre qu'un mince croissant, tout en laissant apercevoir le reste de son disque, au moyen de la *lumière cendrée*, on remarque que le croissant déborde notablement le disque, beaucoup moins éclairé.

M. Plateau a constaté, entr'autres, que l'irradiation est d'autant plus étendue que l'éclat de l'objet est plus grand, et qu'on le regarde plus longtemps; elle varie suivant les individus, et, pour le même individu, d'un jour à l'autre; les lentilles convergentes la diminuent, et les lentilles divergentes l'augmentent.

On explique généralement l'irradiation, en admettant que l'impression produite sur la rétine par les rayons intenses, se propage au-delà du contour de l'image formée. Telle est la théorie développée par M. Plateau [1]; et nous verrons, en parlant des couleurs accidentelles, qu'une semblable propagation existe évidemment dans certains cas. M. Trouessart, dans un remarquable travail sur la vision [2], trouve une autre cause de l'irradiation, dans la formation d'images multiples qui se dépassent un peu les unes les autres, de manière à augmenter l'étendue de l'image résultante. Ces images multiples, dont l'existence a été prouvée par un grand nombre d'expériences, sont très distinctes pour les yeux myopes, mais plus difficiles à apercevoir pour les vues ordinaires, et disparaissent à la distance de la vision distincte; ce qui explique pourquoi l'irradiation n'est plus sensible à cette distance. Quant à la cause des images multiples, qui ont été aussi observées par Lahire, Mile, Dugès; M. Trouessart la trouve dans la présence de points opaques ou transparents distribués sur la cornée, ou dans des corpuscules disséminés dans l'humeur aqueuse, le cristallin et le corps vitré, et observés par Lewenhoek. Ces corpuscules forment une espèce de réseau qui multiplie les images, comme on peut l'observer en regardant à travers une fine toile ou à travers une carte criblée de petits trous. Certains faits, décrits et expliqués par Peclet, viennent confirmer l'existence des points obscurs de l'œil.

Raies dans une fente. — Quand on regarde une surface lumineuse, à

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences de Bruxelles*, t. XI.

[2] *Recherches sur quelques phénomènes de la vision*, etc.; Brest, 1854.

travers une fente étroite placée à une distance moindre que celle de la vision distincte, on aperçoit un grand nombre de raies obscures parallèles à la fente, dont la position et l'aspect sont indépendants de la couleur et de la grandeur de la surface éclairée. Ces raies, moins nombreuses quand on éloigne la fente de l'œil, disparaissent quand elle est à la distance de la vision distincte ; elles changent de place et s'affaiblissent quand on élargit la fente. Peclet regarde chacune de ces raies comme formée par l'ombre d'un point obscur de l'œil ; les ombres sont linéaires à cause de la forme de la fente ; elles se réduisent à des points quand la fente est remplacée par un petit trou. Si l'on place très près de l'œil, derrière la fente, une lame de verre sur laquelle est marqué un point noir, on voit une raie noire parallèle à la fente, ce qui confirme l'explication de Peclet[1].

Rayonnance. — Quand on regarde un objet brillant assez éloigné pour que son diamètre apparent soit très petit, on le voit comme un point d'où partent des traits brillants plus ou moins nombreux, rayonnant dans toutes les directions. Ces traits se forment dans l'œil, car si l'on incline la tête, le système des rayons tourne en même temps que l'œil. Parmi ces rayons, il y en a de verticaux, ordinairement plus longs que les autres. Ces derniers s'expliquent par la réfraction des rayons lumineux dans le liquide qui lubrifie la cornée et forme un ménisque entre la conjonctive et les paupières. Ils sont d'autant plus longs que l'œil est plus humide, et qu'on rapproche davantage les paupières. Les autres rayonnances, plus ou moins obliques, sont attribuées par Young aux sutures du cristallin (2147), opinion partagée par Dugés. D'autres n'y voient qu'un effet d'irradiation intense, modifiée par la structure de la rétine, dont les fibres vont en rayonnant.

2156. DURÉE DE L'IMPRESSION. — L'impression produite sur la rétine, dure quelques instants après que la cause qui l'a produite a cessé d'agir. Par exemple, si l'on fait passer plusieurs fois de suite et très rapidement un charbon ardent derrière une petite ouverture, elle paraîtra constamment illuminée ; l'impression produite pendant un des passages persiste donc encore, quand le charbon passe de nouveau. Un objet brillant qui tourne avec rapidité, produit une courbe continue. L'aspect uni d'une roue qui tourne rapidement, le mélange des couleurs dans le disque de Newton (2030), le renflement que présente une corde vibrante, sont dus à la même cause. Un corps sombre, qui passe rapidement devant l'œil, comme une balle de fusil, un boulet de canon, n'est pas aperçu ; l'impression de la lumière de l'atmosphère persistant pendant le temps que l'image du corps emploie à parcourir son propre diamètre, c'est-à-dire pendant le temps très court qu'elle se projette sur un point donné de la rétine. Si le corps était brillant, sa rapidité n'empêcherait pas de le voir, seulement on verrait une ligne lumineuse à la suite du corps, l'image produite sur la rétine persistant en chaque point, après qu'elle l'a quitté.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LIV, p. 379.

2157. Mesure de la durée de l'impression. — M. d'Arcy a cherché à mesurer la durée de l'impression reçue par la rétine, au moyen d'un charbon ardent tournant en cercle, en prenant pour durée le temps d'une révolution, quand la courbe lumineuse devenait continue. Mais on n'obtient ainsi que le temps pendant lequel l'impression ne diminue pas sensiblement. Aimé a employé un procédé plus exact : deux disques de carton tournent *en sens contraire* sur un même axe, avec des vitesses égales. Le mouvement leur est communiqué par une même roue à deux gorges, sur laquelle passent deux cordons sans fin qui enveloppent des poulies égales fixées aux centres des disques. L'un des disques est percé, prés de son contour, d'ouvertures rectangulaires étroites, égales et équidistantes ; l'autre ne possède qu'une ouverture semblable. L'appareil étant placé devant une vive lumiére, et tournant lentement, on aperçoit un rectangle lumineux, qui change de place et se montre partout où l'ouverture du second disque passe derriére une des ouvertures du premier. Mais si la vitesse de rotation est assez grande pour que l'impression produite par l'une des apparences lumineuses persiste quand la suivante se produit, on aperçoit deux rectangles lumineux à la fois ; si la vitesse est encore plus grande, on en aperçoit trois. La durée de l'impression est alors égale, au moins, au temps que met l'ouverture unique à parcourir l'arc sur lequel sont distribuées celles qui paraissent illuminées simultanément ; temps qui est connu d'aprés la vitesse de rotation et le nombre d'ouvertures du disque. Les rectangles illuminés peuvent l'être avec des intensités différentes, ce qui permet d'évaluer la durée de l'impression, en tenant compte de son accroissement et de son affaiblissement progressifs.

M. Plateau, qui a fait beaucoup d'expériences par ce procédé, qu'il a varié et perfectionné, a obtenu les résultats suivants : 1° la durée moyenne de la sensation est d'environ 0s,14 , 2° il faut que la lumiére agisse pendant un certain temps, pour que la rétine reçoive l'impression complète ; 3° l'impression maximum persiste, avant de décroître, pendant un temps d'autant plus long qu'elle a été *plus faible* ; ce temps est moindre que 0s,008 pour un papier blanc exposé au grand jour. Si le papier est moins blanc, ce temps est plus grand ; il augmente quand on remplace le papier blanc par du papier jaune, rouge, bleu. 4° La durée *totale* de l'impression augmente en même temps que l'éclat de la lumière. 5° L'impression ayant eu le temps de devenir complète, la durée totale diminue quand l'œil est plus longtemps impressionné, la sensibilité se trouvant alors émoussée.

2158. Effets produits par la persistance des impressions. — Il résulte de la persistance des impressions sur la rétine, qu'on ne peut distinguer la forme d'un corps qui se meut rapidement. En effet, l'axe de l'œil ne pouvant se déplacer assez vite pour suivre le corps, l'image de ce dernier se déplace sur la rétine, ou plutôt il se forme une série d'images, qui persistant, se superposent en partie et produisent une bande confuse parallèle à la direction du mouvement du corps. Pour distinguer la forme de ce dernier, il faudrait ne le

voir que pendant un temps assez court pour qu'il n'ait pas le temps de se déplacer sensiblement. C'est ce que l'on fait en le plaçant dans l'obscurité, et l'éclairant au moyen d'une étincelle électrique. Malgré la durée imperceptible de celle-ci, comme l'impression persiste, on peut distinguer les principaux détails du corps. — M. Plateau emploie un autre moyen, applicable particulièrement aux corps dont le mouvement est périodique : on regarde le corps à travers les ouvertures étroites et disposées circulairement d'un disque de carton noir, auquel on imprime un mouvement rapido de rotation. Le corps sera vu d'abord par une des ouvertures, pendant un temps trop court pour qu'il ait le temps de se déplacer ; il sera donc vu comme s'il était en repos. Si la vitesse de rotation du disque est telle que le même corps ou des corps semblables passent devant l'œil au moment où une autre ouverture y passe également, il se formera au même point de la rétine une suite d'impressions identiques, qui se confondront en une seule, à cause de leur durée, et l'objet sera vu comme s'il était en repos. Il suffira, en accélérant peu à peu le mouvement du disque, d'arriver à lui donner une vitesse convenable. On peut ainsi distinguer et compter les dents d'une roue tournant rapidement.

Savart a fait une application heureuse des principes qui précèdent à l'étude de la constitution de la partie trouble de la veine liquide. Il faisait mouvoir derrière la veine verticale, un ruban sans fin, passant sur deux rouleaux, auxquels était imprimé un mouvement rapide de rotation. Ce ruban était noir et portait des bandes blanches transversales de 1^{cm} de largeur et écartées de 7^{cm}. L'eau étant fortement noircie, quand la vitesse du ruban ascendant atteignait celle de la veine, les bandes blanches arrivaient à une hauteur donnée au moment où y arrivaient également les espaces compris entre deux gouttes, et l'on apercevait une série de bandes noires séparées par des bandes blanches et paraissant absolument fixes. — M. Billet-Gelis obtient le même résultat par un moyen trés ingénieux et beaucoup plus simple. On fait tomber la veine un peu en deçà du centre d'un grand miroir sphérique, qui en donne une image réelle renversée, dont le mouvement a lieu de bas en haut ; on place l'œil de manière que cette image se projette sur la veine, et l'on voit les gouttes immobiles.

Anorthoscope. — Voici encore d'autres résultats étudiés d'abord par M. Plateau [1], puis un peu plus tard par M. Faraday. Si l'on fait tourner en sens inverse et avec la même vitesse, deux roues égales assemblées sur le même axe, on aperçoit une roue fixe ayant deux fois plus de rais que chacune des roues. Pour expliquer ce résultat, remarquons que chacune des roues présenterait, en tournant seule, une surface unie. Quand les roues tournent en même temps, et qu'un des rayons de l'une d'elles passe entre deux rais de l'autre, l'impression est uniforme et égale à la somme des impressions que produirait chaque roue séparément ; mais, quand deux rais se superposent,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLVIII, p. 281.

l'impression est différente ; plus faible si les rais sont noirs, plus vive s'ils sont brillants. Si les coïncidences ont lieu toujours au même point, on verra des rais fixes, à cause de la persistance des impressions. Or, si l'une des roues était fixe, les coïncidences auraient lieu là où sont ses rais ; mais si elle tourne en sens contraire de la premiére et avec la même vitesse, les lieux de croisement seront évidemment deux fois plus nombreux. Si les vitesses n'étaient pas tout à fait égales, les lieux de croisement se déplaceraient, et l'on verrait une roue tournant lentement, dans l'un ou l'autre sens.

Quand on regarde dans une glace une roue dentée tournant avec une certaine vitesse, à travers les dents supposées en nombre multiple de celui des rais, ces derniers paraissent fixes. Ici, le mouvement se fait dans le même sens ; mais on ne peut voir un rais qu'au moment où il passe devant l'œil en même temps qu'un intervalle de deux dents.

2159. Applications de la persistance des impressions. — Nous avons eu plusieurs fois à citer des applications de la persistance des impressions dans l'œil ; nous rappellerons le photométre de M. Wehatstone (1887) et les expériences de M. Lissajous sur la comparaison des mouvements vibratoires (I, 564). On a aussi construit divers instruments dont le jeu est fondé sur cette durée des impressions.

Chromatrope. — Des disques de verre, tournant en sens contraire, portent des rayons courbes de différentes couleurs qui, en s'entrecroisant, produisent des effets trés variés, en présentant des lignes en mouvement lent, partout où il y a superposition des rayons. Comme les points de croisement changent de distance au centre, à cause de la courbure des rayons, on aperçoit en même temps des mouvements autour du centre et d'autres dans le sens du rayon. En plaçant les disques dans un faisceau divergent obtenu au moyen d'une lentille, on projette ces images mobiles sur un écran.

Thaumatrope. — Si l'on fait tourner rapidement *autour d'un de ses diamètres* un disque sur lequel est représenté nn dessin, on distingue le dessin malgré le mouvement, parce qu'il paraît plus longtemps dans la position où le disque est à peu près perpendiculaire à l'axe de l'œil, que dans toute autre, de manière qu'on le distingue sur le fond formé par le mélange des impressions produites dans toutes les autres positions. Si maintenant une partie du dessin se trouve d'un côté du disque, et l'autre, du côté opposé à la place correspondante, ces deux parties paraîtront réunies pendant le mouvement, et le dessin se trouvera complété. Si l'on emploie deux disques perpendiculaires entre eux et tournant autour du diamétre commun, on pourra mettre sur chacune des quatre surfaces, une partie seulement du dessin, et les quatre parties paraîtront réunies pendant la rotation.

Phénakisticope. — Imaginons un même dessin répété un certain nombre de fois près du contour d'un disque de carton, et regardons-le à travers des ouvertures équidistantes en nombre égal, pratiquées près du bord d'un autre disque un peu plus grand, et tournant dans le même sens avec la même vitesse,



nous verrons le dessin comme s'il était au repos (2158). Si maintenant nous supposons que les dessins représentent un même sujet dans des attitudes qui changent un peu quand on passe de l'un à l'autre, les impressions successives produites dans l'œil feront voir le sujet dans des positions se modifiant progressivement, de manière qu'il semblera s'animer et exécuter les mouvements qui correspondent aux diverses attitudes représentées L'idée de cette expérience est due à M. Plateau, et le système des disques se nomme *fantascope* ou *phénakisticope*. Au lieu de regarder le carton peint à travers le carton troué, on peut appliquer le premier derrière le second, et regarder, à travers les trous, l'image du premier réfléchie dans une glace.

Si, au lieu de dessins complets, on dispose circulairement des portions de dessin pouvant se compléter les uns les autres, on verra, pendant la rotation, un sujet complet, comme dans le thaumatrope. On peut aussi, en donnant aux deux disques des vitesses différant dans un rapport donné, au moyen de poulies et de cordes sans fin, faire en sorte que l'on aperçoive un dessin régulier à la place de figures bizarres. L'instrument se nomme alors *pseudoscope*.

V. Rapport entre le jugement et la sensation.

2160. L'excitation que produit la lumière, a lieu sur la rétine ; c'est l'image qu'elle reçoit que nous percevons, et nous avons la faculté de remonter, de l'impression produite par les différents points de cette image à la cause extérieure qui lui a donné naissance. Nous pouvons apprécier la distance des points d'où émane la lumière, juger de la forme et de la grandeur des objets, nous rendre compte de leurs positions relatives. Mais ces divers jugements ne se font pas avec sûreté, les erreurs et les illusions sont fréquentes, et le moindre changement dans les habitudes de l'observateur suffit pour le jeter bien loin de la vérité. Les explications qui ont été données des divers phénomènes dont nous allons nous occuper ont été confirmées par les observations qui ont été faites sur des aveugles de naissance, auxquels on a rendu la vue au moyen d'opérations chirurgicales. Parmi ces observations, les plus célèbres sont dues au chirurgien anglais Cheselden ; elles ont été faites sur un jeune homme fort intelligent, auquel il rendit la vue, à ce que l'on croit, par la perforation de la membrane de l'iris.

2161. Pourquoi on ne voit pas renversé. — Remarquons d'abord que l'âme n'est pas un personnage debout, regardant l'image formée sur la rétine ; le jugement de la situation des objets ne dépendra donc pas nécessairement de celle de l'image. Cela posé, trois systèmes principaux ont été mis en avant sur ce sujet. Les métaphysiciens, Locke, Condillac..., attribuaient le jugement de la position droite des objets à l'habitude de comparer l'impression produite dans l'œil, avec la connaissance, donnée par le tact, de la position réelle des objets ; mais l'aveugle de Cheselden a vu les objets droits, dès qu'il a com-

mencé à en distinguer la forme. Les géomètres, Descartes, Kepler...., puis Musschenbroeck, invoquent le sentiment que nous avons de la direction dans laquelle arrivent les rayons lumineux, de manière que nous rapportons les positions des points lumineux aux axes secondaires qui leur correspondent, axes qui se croisent au centre optique de l'œil. Descartes compare ces axes à deux bâtons croisés qu'un aveugle tient dans ses mains; quand le bâton tenu dans la main droite rencontre un obstacle, l'aveugle *sent* que cet obstacle est du côté gauche, et réciproquement. Cette théorie a été développée par d'Alembert, puis par M. Brewster, qui a posé en loi que *nous transportons l'impression reçue, dans la direction normale à la surface de la rétine*, qui est à peu près sphérique. C'est ainsi que la direction dans laquelle vient nous frapper un projectile que nous ne voyons pas, nous semble toujours normale au point frappé. Nous transportons donc en bas l'impression reçue en haut dans l'œil, et réciproquement.

Une troisième théorie adoptée par MM. Muller, Volkmann.... a réuni beaucoup de partisans. On a fait remarquer que le haut et le bas ne sont pas des choses absolues : nous appelons *bas* le côté du sol, et *haut* le côté opposé; or, puisque les images de la terre et du ciel se peignent renversées sur la rétine, comme celle des objets que nous regardons, l'image de ceux-ci doit nous paraître *droite* par rapport à ces termes de comparaison. Mais on peut objecter que, dans une lunette qui renverse, les objets, quoique tous renversés, ne nous paraissent pas droits; c'est que nous avons le sentiment du haut et du bas de notre corps; or, il en est de même quand nous percevons les images faites sur la rétine. Il faut donc en revenir à l'explication très satisfaisante développée par d'Alembert et Brewster.

2162. Vision binoculaire. — Nous avons deux yeux, dans chacun desquels se forme l'image des objets; comment se fait-il que ces objets ne nous paraissent pas doubles? Ce point a paru longtemps très embarrassant. Porta avait cru lever la difficulté en admettant que la sensibilité de l'un des yeux l'emportait toujours sur celle de l'autre, de manière qu'une des sensations faisait disparaître l'autre. Mais si l'on déplace l'un des yeux avec le doigt, on voit double; les deux impressions existent donc. Si l'on place devant les yeux, des verres de couleur différente et qu'on regarde un corps blanc, ce corps paraît coloré de la nuance qui résulte du mélange des deux couleurs qu'il présenterait si on le regardait successivement avec chaque œil.

La fusion des deux impressions en une seule vient simplement, comme l'admettaient Aristote et Ptolémée, de l'habitude que nous avons contractée de sentir certains points des deux rétines impressionnées simultanément, quand elles reçoivent la lumière émanant d'un même centre. Ces points nommés *points identiques*, sont situés à la rencontre des rétines avec les axes des yeux convergeant vers le centre lumineux. Si l'on pousse l'un des yeux avec le doigt, de manière que les images ne se fassent plus en des points identiques, on voit double. Il en est de même quand on louche volontairement, les points frappés



sur les deux rétines, quoique placés symétriquement, n'étant pas ceux, très voisins de l'axe, qui sont habituellement affectés simultanément. Par la même raison, on voit aussi double, les objets plus éloignés ou plus rapprochés que ceux que l'on regarde directement, et vers lesquels convergent les axes des yeux. Si l'on ferme un œil et qu'on l'ouvre brusquement, au premier moment, on voit double l'objet que l'on regardait, l'œil fermé n'ayant pas son axe dirigé vers cet objet; mais cet œil se dirige aussitôt, et les deux images se confondent. Quand on ferme et qu'on ouvre alternativement les deux yeux, on voit l'objet osciller en se portant du côté de l'œil qu'on ouvre, ce qui montre que son axe se place pendant qu'il est fermé, sous l'influence de l'élasticité des muscles droits, dans une position normale à la ligne des deux yeux.

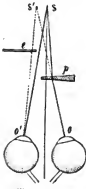


Fig. 1597.

Du reste, cet effet de l'habitude se manifeste dans d'autres sens, par exemple dans le toucher, et l'on ne sent pas 10 objets quand on palpe un même corps au moyen des extrémités des 10 doigts. Mais si l'on vient, comme l'indique Aristote, à toucher un même corps au moyen des deux doigts croisés l'un sur l'autre, de manière que ce corps les touche en des points qui, d'habitude, ne sont impressionnés simultanément que par deux corps différents, on *sentira double*, et malgré la certitude que l'on a de la présence d'un seul corps, on aura quelque peine à se défendre de l'illusion.

Voici deux autres expériences très curieuses, qui montrent bien la fusion des images faites sur les points identiques. On regarde une bougie *s* (*fig.* 1597) avec les deux yeux, puis on interpose un prisme *p* ayant un angle de 2 à 3°, dans le trajet des rayons qui vont à l'un d'eux, *o*; aussitôt on voit double. Mais l'œil *o*, en se déplaçant, amène bientôt l'image réfractée au point correspondant à celle de l'autre œil, et les deux sensations se confondent. Si alors on place une autre bougie en *s'*, sur le prolongement du rayon dévié par le prisme, et si l'on place un écran *e* qui la cache à l'œil *o'*, au moment où l'on enlèvera brusquement le prisme, les images des deux bougies se confondront en une seule [1].

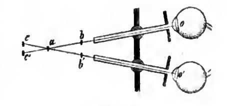


Fig. 1598.

La seconde expérience est due à M. Wheatstone : on regarde un point lumineux *a* (*fig.* 1598) à travers deux tubes noircis, auxquels on applique chaque œil, et qui sont dirigés vers le point *a*. Si l'on place deux objets

[1] Herschel, *Traité d'optique*, traduction française, t. I, p. 190.

identiques en *b* et *b'*, ou en *c* et *c'*, sur les directions *oa*, *o'a'*, on ne voit qu'un objet, qui semble situé en *a*; les images des deux objets *b*, *b'* ou *c*, *c'* se confondant, parce qu'elles se font en des points correspondants des deux rétines.

2163. Horoptre. — Les points symétriques voisins des axes optiques des yeux ne sont pas les seuls dont les deux images se confondent, pour un même état de l'œil; les points placés symétriquement plus loin de ces axes, peuvent donner aussi une sensation unique, seulement l'image est trouble, parce qu'elle sort du champ de la vision nette (2141). Le lieu des points lumineux qui jouissent de la propriété de former dans les deux yeux des images symétriques, et qui par conséquent sont vus simples à la fois, se nomme *horoptre*. Agulonius, Porterfield, pensaient que cette ligne était une droite parallèle à la ligne des yeux; mais M. Vieth et M. Muller ont trouvé que, si l'on suppose le centre optique de l'œil confondu avec le centre de la sclérotique, ce qui a lieu approximativement, l'horoptre n'est autre chose que la circonférence passant par les centres optiques *c*, *c'* (*fig.* 1599) et par le point de convergence A des axes des yeux. En effet, soit M un point de cette circonférence, et *m*, *m'* les images de ce point; les arcs *am*, *a'm'* étant égaux, comme mesurant des angles égaux McA, Mc'A, ces images sont également distantes des extrémités *a*, *a'* des axes optiques, et par conséquent les sensations se confondent. On voit aussi que les angles *c*M*c'*, *c*A*c'*, ayant la même mesure, $\frac{1}{2}cc'$, l'horoptre est une courbe telle que les axes des yeux convergeant vers un de ses points forment toujours le même angle. On voit enfin que le déplacement *ma* de l'image sur la rétine, quand le point passe de A en M, est, *en degrés*, la moitié du déplacement de ce dernier; car l'arc AM contient deux fois plus de degrés que *am*, puisqu'il en faut prendre la moitié pour mesure de l'angle McA, qui est égal à *mca*. — Si nous faisons tourner le plan de la figure autour d'une droite passant par les points *c*, *c'* nous obtiendrons un tore, dont tous les points jouiront des propriétés de l'horoptre dans le plan *c*A*Mc'*.

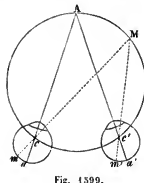


Fig. 1599.

On a objecté à cette théorie de l'horoptre, que les divers points d'un même objet ne devraient être vus simples qu'autant qu'ils seraient distribués sur la surface d'un tore. Mais, comme le fait remarquer M. Brewster, la vision n'étant nette que pour les points situés sur les axes des yeux, ou pour ceux qui sont très prés de ces axes, la perception des autres est trop confuse pour qu'on puisse reconnaître s'ils sont vus simples ou doubles. On peut même, quand il s'agit d'un corps très brillant éloigné de l'axe, reconnaître, quoiqu'elle soit

très confuse, que l'impression est généralement double, ou du moins on ne peut affirmer si elle est simple ou double. On peut se demander alors à quoi servent les images confuses qui se font autour de l'axe de l'œil ; elles servent à le guider dans les déplacements rapides (2141) par lesquels il va explorer successivement les différents points de l'objet. Sans cette indication confuse de la position de ces points, l'œil devrait chercher au hasard les divers détails qu'il doit voir successivement avec netteté.

2164. Demi-décussation des nerfs optiques. Hémiopsie. — Wollaston a essayé d'expliquer la fusion des sensations dans les deux yeux, et la convergence spontanée de leur axe vers le point que l'on regarde, par la manière dont les fibres nerveuses partant des deux côtés du cerveau se distribuent dans les nerfs optiques. Il remarqua un jour qu'il ne distinguait que la moitié des objets, ainsi ; en regardant, avec un seul œil ou avec les deux yeux, le milieu d'un mot, il n'en distinguait que la dernière moitié. Ce phénomène, connu sous le nom d'*hémiopsie*, avait été observé déjà par plusieurs personnes, entr'autres par Arago. Il se manifeste assez souvent dans le cas de migraine, comme nous l'avons éprouvé nous-même ; le côté frappé d'insensibilité est opposé au côté où siége la douleur. Cet état anormal disparaît ordinairement au bout de quelques quarts d'heures. Wollaston cite un cas d'hémiopsie permanente ; le côté droit des objets était invisible, et cet état s'était déclaré après une douleur aiguë à la tempe gauche

Pour expliquer ce phénomène, Wollaston remarque que les nerfs optiques partant des deux moitiés du cerveau se réunissent et semblent se confondre, puis se séparent de nouveau pour aller à chaque œil. On a cru longtemps que les fibres se croisaient au point de jonction, et que toutes celles qui forment le nerf qui part du côté droit du cerveau continuaient à rester réunies pour former le nerf optique de l'œil gauche, et réciproquement ; comme cela a lieu, du reste, chez certains animaux. Mais, pour expliquer l'hémiopsie, Wollaston admet que chez l'homme, les nerfs n'éprouvent qu'une *demi-décussation* ; chacun d'eux se bifurque ; une partie se porte dans l'œil du même côté, et forme la moitié de la rétine de ce côté ; l'autre partie va à l'autre œil et forme la moitié de la rétine qui est aussi du même côté ; de manière que les moitiés des deux rétines qui sont du même côté, sont insensibles simultanément, si la partie du cerveau d'où part le nerf qui, en se bifurquant, donne naissance à ces deux moitiés, se trouve dans un état anormal.

La sémi-décussation qui a été prouvée directement, depuis, par des dissections attentives, chez l'homme et les vertébrés supérieurs, a pour premier effet d'intéresser les deux moitiés du cerveau dans la vision avec un seul œil. En outre, les images d'un même point M (*fig.* 1599) se forment du même côté sur les deux rétines, c'est-à-dire sur des parties composées de fibres nerveuses ayant leur origine dans les mêmes points du cerveau ; ce qui donne

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 102.

l'explication de la fusion des deux sensations. Wollaston trouve aussi, dans la demi-décussation, la cause qui dirige les axes optiques sur le point lumineux : les yeux cherchant à éprouver l'impression des images d'un même point extérieur, sur des fibres ayant la même origine dans le cerveau. Cependant, on peut aussi attribuer l'orientation des axes, à la tendance des yeux à chercher la position pour laquelle on voit nettement, c'est-à-dire pour laquelle les images se forment au point où les axes des yeux rencontrent la rétine (2152).

Quant à l'utilité de la vision binoculaire, il est à remarquer d'abord qu'elle rend l'impression plus vive, comme on peut s'en assurer par divers moyens, entr'autres en déplaçant un des yeux avec le doigt, de manière que les images d'une feuille de papier soient séparées et se superposent en partie ; on reconnaît qu'il y a plus d'éclat dans les parties superposées. Si la feuille est colorée, la couleur est plus vive dans ces mêmes parties. Nous verrons, en outre, que l'action simultanée des deux yeux joue un rôle important dans le jugement de la distance et l'appréciation de la forme et du relief des objets.

2165. Jugement de la distance. — Le jugement que nous portons de la distance des objets est fondé sur des éléments très complexes, et n'est un peu certain que pour les petites distances.

Cas des petites distances. — Quand l'enfant en bas âge commence à discerner les impressions de la lumière, tous les objets lui semblent toucher à ses yeux ; aussi, le voit-on tendre la main pour saisir les objets éloignés, et la porter au-delà de ceux qui sont très rapprochés. Ce n'est qu'à la suite d'une longue expérience qu'il peut rapporter à une cause extérieure l'ébranlement produit au fond de son œil. L'aveugle de Cheselden, qui a pu rendre compte de ses impressions, crut pendant longtemps que tout ce qu'il voyait touchait ses yeux, comme les objets qu'il palpait touchaient ses doigts, et ce n'est qu'à la longue qu'il arriva à voir les corps dans leur véritable position. L'éducation de l'organe se fait, à cet égard, par la comparaison fréquemment répétée entre les données du tact, qui permet d'apprécier les distances, et celles de la vue. On finit par avoir conscience du degré de convergence des axes des yeux, et de l'effort que chaque œil doit faire pour s'adapter à chaque distance, et l'on en déduit cette distance. Le concours des deux yeux joue ici le rôle le plus important, comme il est facile de s'en assurer en regardant avec un seul œil ; alors on se trompe gravement, même pour les distances assez petites. Par exemple, ce n'est qu'avec incertitude qu'on peut, en fermant un œil, poser la plume sur la lettre qu'on vient de quitter, et ce n'est qu'après plusieurs tâtonnements qu'on parvient à faire passer une baguette dans un anneau vu de profil. Cependant les borgnes finissent par acquérir, au moyen de l'adaptation de l'œil, l'habitude de juger avec quelque précision des petites distances; mais leur adresse à cet égard est toujours inférieure à celle des individus qui voient des deux yeux.

Ce que l'œil apprécie, en définitive, c'est le degré de divergence du faisceau qui entre par la pupille, degré de divergence qui détermine l'état que doit

prendre l'œil pour voir nettement. Il en résulte que, quelle que soit la position du point lumineux, il apparaîtra toujours au sommet du cône formé par les rayons divergents qui entrent dans l'œil, prolongés s'il est nécessaire. Ce fait, établi pour la première fois par Barrow, est la source d'une foule d'illusions d'optique ; il nous a servi à expliquer les effets de plusieurs instruments d'optique, entr'autres de ceux des miroirs plans ou courbes.

Cas des objets éloignés. — Quand il s'agit d'objets situés à de grandes distances, les éléments d'appréciation dont nous venons de parler nous manquent, puisque les axes des yeux ne changent plus sensiblement de position relative, et que l'œil n'a plus besoin de s'adapter (2144). Le jugement de la distance ne peut alors se fonder que sur des données assez incertaines. Tantôt on fait intervenir l'éclat des objets, tantôt la netteté avec laquelle on les distingue à travers l'air plus ou moins pur. C'est ainsi qu'un objet éloigné paraît plus éloigné encore quand on le regarde à travers un verre bleu qui en diminue l'éclat. De deux lumières vues pendant la nuit, la plus éloignée nous semblera la plus rapprochée si, malgré la distance, elle paraît la plus brillante. Les peintres ont soin de donner moins de netteté aux parties du dessin qu'ils veulent faire paraître à une grande distance. Un habitant d'un pays de plaine, transporté dans les montagnes, où l'air est généralement très pur, croit toujours les objets éloignés beaucoup plus rapprochés qu'ils ne sont ; les flancs des montagnes semblent plus escarpés qu'ils ne le sont réellement, les sommets paraissant trop rapprochés par rapport à leur base ; aussi quand on représente les montagnes en relief, a-t-on soin, pour qu'on les reconnaisse, d'exagérer les hauteurs par rapport aux dimensions horizontales.

Les objets interposés jouent aussi un rôle important dans l'évaluation des grandes distances ; plus ils sont nombreux, plus la distance paraît grande ; parce qu'ils forment autant de points de repère qui servent à l'évaluer. Un clocher vu par-dessus un toit qui cache tous les objets intermédiaires, semble toucher au toit, quoiqu'il en soit très éloigné.

Enfin, la grandeur connue des objets peut aider à apprécier leur distance, leur image sur la rétine étant d'autant plus petite qu'ils sont plus éloignés. C'est ainsi qu'on juge de la distance d'un navire, par la difficulté plus ou moins grande de distinguer les matelots et les détails de leur costume. C'est en agrandissant les images de la fantasmagorie qu'on produit dans l'obscurité l'illusion qui fait croire que ces images se rapprochent.

2166. Jugement de la grandeur. — Quand plusieurs objets sont à la même distance de l'œil, nous jugeons de leur grandeur relative en comparant les dimensions des images faites sur la rétine ; ces dimensions étant alors entre elles comme les diamètres apparents des objets. Mais quand les distances sont différentes, le jugement que nous portons des grandeurs relatives des objets, dépend à la fois des dimensions de l'image faite sur la rétine, et de l'idée que nous nous faisons de la distance de ces objets. Occupons-nous d'abord de la grandeur de l'image.

Grandeur de l'image. — On admet généralement que le diamètre absolu de l'image sur la rétine est en raison inverse de la distance de l'objet à l'œil, ou plus exactement au centre optique de l'œil. Ce principe géométrique serait vrai si, l'œil, ne changeant pas d'état d'après la distance des objets, l'image se formait toujours à la même distance du centre optique ; mais nous savons qu'il n'en est pas ainsi. La grandeur de l'image doit donc varier suivant une loi plus compliquée.

M. Lubinoff a montré, en outre, que la grandeur de la pupille a une influence marquée sur les dimensions de cette image [1]. Pour mettre ce fait en évidence, on prend deux disques inégaux, on fixe le plus grand derrière le plus petit sur une règle divisée fixe, et on les regarde par une ouverture plus grande que la cornée transparente ; on trouve que le plus grand disque, pour être complétement caché par le plus petit, doit être plus éloigné que ne l'indique la loi géométrique ; les distances étant comptées, soit de la surface de la cornée, soit du centre optique de l'œil. — Si le petit disque est remplacé par une ouverture de même diamètre, et si le grand disque, peint sur un carton, est placé à la distance pour laquelle il était caché par le petit disque de l'expérience précédente, on voit autour du grand disque une portion du fond, formant une espèce d'auréole qui l'entoure. Si on l'éloigne de manière à ce que cette auréole disparaisse, et qu'on replace le petit disque, le grand n'est plus entièrement caché. Ces phénomènes prouvent que « la vision n'est pas bornée par les limites géométriques de l'angle visuel. L'œil voit un peu derrière l'obstacle que lui présentent les bords du disque opaque, dans le premier cas, et ceux de l'ouverture, dans le second. » Si l'on remplace le petit disque par un anneau mince, formé par exemple avec un fil de fer noirci, on obtient à la fois les résultats donnés par le petit disque ou par l'ouverture qui le remplace ; c'est-à-dire que l'on voit le grand disque dépasser le bord extérieur de l'anneau, pendant que le bord intérieur paraît bordé d'une auréole formée par le fond sur lequel est peint ce disque.

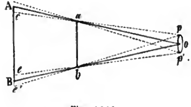


Fig. 1600.

Ces résultats dépendent de la grandeur de la pupille ; car, si l'on regarde par un très petit trou, ils disparaissent, et, avec une fente étroite, les effets n'ont lieu que dans le sens de la fente. Voici comment ils s'expliquent : Soit *pp′* (*fig.* 1600) l'ouverture de la pupille, *ab*, AB les deux disques ; menons l'angle visuel *aob* par les bords du premier, en prenant le centre de la pupille pour sommet de cet angle. Si les points A et B sont sur le prolongement de *oa* et *ob*, le disque AB sera à la distance pour laquelle il serait caché

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LIV, p. 13.

géométriquement. Mais remarquons que si nous menons la droite *ebp'* qui passe par le bord *p'* de la pupille, les points situés en *e*B enverront des rayons dans l'œil; ces rayons se réuniront sur la rétine et feront voir ces points. Le disque AB paraîtra donc autour de *ab*, et il faudra éloigner le premier jusqu'à ce que ses bords touchent les droites *cap* et *ebp'*, pour qu'il soit invisible. On verrait de même que, si *ab* était remplacé par une ouverture, on apercevrait une bande de largeur égale à B*e'* tout autour du disque AB placé dans l'angle *aob*.

Influence de la distance. — A égalité de grandeur de l'image de la rétine, nous jugeons les objets d'autant plus grands que nous les supposons plus éloignés, parce qu'une longue expérience nous a appris que l'éloignement d'un objet est accompagné d'une diminution dans les dimensions de l'image. Ainsi, un homme ne nous semble pas plus grand à 3 mètres qu'à 20, quoique l'image sur la rétine soit beaucoup plus petite dans le dernier cas. L'aveugle de Cheselden ne pouvait d'abord reconnaître les grandeurs relatives des objets ; par exemple, il ne concevait pas comment un portrait en miniature pouvait être renfermé tout entier dans sa main, tandis que la tête du modèle ne pouvait être contenue dans ses deux mains. Ce ne fut qu'après une longue expérience qu'il put comparer les grandeurs des objets. Ils lui parurent d'abord tous très gros, et ce ne fut qu'en en voyant de plus grands, qu'il jugea les premiers plus petits. L'influence de la distance le jetait aussi dans des erreurs continuelles, qu'il apprit peu à peu à éviter.

Il résulte de là que tout ce qui peut nous tromper sur les distances, nous trompe également sur les grandeurs. Par exemple, un grand nombre d'objets interposés faisant juger les distances plus grandes (2165), feront paraître plus grands les corps situés au delà. C'est ainsi qu'un homme placé au haut d'une pente couverte de pierres, de plantes, etc., nous semble un géant. La lune, le soleil, les constellations, près de l'horizon, paraissent beaucoup plus grands qu'au zénith ; cependant leur diamètre angulaire est moindre. Cette illusion, qui a été expliquée par Alhazen, vient de ce que la voûte céleste paraissant surbaissée au zénith, parce qu'elle y est plus éclairée qu'à l'horizon, les astres nous semblent plus éloignés quand ils sont près de l'horizon. Les objets terrestres interposés concourent aussi à faire paraître la distance plus grande. Si l'on regarde l'astre à travers un tube qui empêche de voir la voûte céleste et les objets terrestres, l'illusion disparaît.

Quand les objets sont très grands, de manière que l'œil ait besoin de beaucoup se déplacer pour en observer les différentes parties, le jugement de leur grandeur dépend aussi des détails plus ou moins nombreux qu'ils présentent, et qui servent à apprécier le déplacement éprouvé par l'œil. C'est ainsi que les édifices dits gothiques paraissent très grands, à cause des nombreuses sculptures qui les décorent, et aussi parce que ces ornements sont d'autant plus nombreux, et non d'autant plus grands, que l'édifice est plus élevé. Dans un monument d'architecture grecque, au contraire, les proportions restent les

impossible de reconnaître de loin si une tour est ronde ou carrée. Les effets de la perspective peuvent quelquefois aider au jugement ; mais il faut alors que la distance ne soit pas trop grande, ou que le corps, de grandes dimensions, comme un édifice, soit orienté de manière à montrer différentes lignes dont on puisse apprécier les angles.

Nous jugeons plus facilement de la situation des objets placés à différentes distances, par la position relative de leurs images sur la rétine, position que nous avons appris à comparer avec celle des objets, en nous aidant de l'appréciation des distances, par la locomotion ou par les différents moyens indiqués ci-dessus (2165). Les positions relatives des images sur la rétine sont soumises à certaines règles géométriques, de manière qu'on peut tracer sur une surface plane, un dessin qui produit dans l'œil la même image que les objets réels. L'étude de ces règles constitue la *perspective linéaire*, science qui paraît avoir pris naissance dans les décorations théâtrales, et dont, d'après Vitruve, un nommé Agatarchus, guidé par Eschyle, aurait donné les premiers principes. C'est au moyen de la perspective linéaire, en combinant les ombres et les teintes, diminuant la grandeur des objets qui doivent paraître les plus éloignés ; affaiblissant leur éclat pour imiter les effets de l'absorption de la lumière par l'atmosphère, en observant les règles de ce qu'on nomme la *perspective aérienne*, que les peintres obtiennent les illusions que produisent leurs tableaux quand on s'en éloigne convenablement. Les bords du tableau nuisent singulièrement à l'illusion en fournissant à l'œil une ligne de repère, à laquelle il compare involontairement les distances des différents points du dessin, de manière à les voir à leur véritable distance. On évite cet inconvénient en regardant à travers un tuyau qui cache le cadre. C'est par un semblable artifice qu'on produit les illusions des *dioramas* et des *panoramas*. Dans le diorama, le spectateur est à une fenêtre dont le contour, qui lui cache les limites du tableau, est très éloigné de la surface peinte, et ne peut servir de terme de comparaison pour juger des distances réelles de ses différents points. Dans le panorama, la peinture est disposée circulairement autour du spectateur, qui en occupe le centre et est placé sur une galerie circulaire, dont le plancher fait saillie de manière à cacher le bord inférieur du tableau. Le bord supérieur est caché par le contour circulaire d'un toit qui recouvre la galerie.

2168. INFLUENCE DES DEUX YEUX SUR L'APPRÉCIATION DU RELIEF. — Un des éléments les plus importants du jugement du relief des corps rapprochés, est fourni par l'action simultanée des deux yeux. Ce rôle de la double vision, a été découvert vers 1833, par M. Wheatstone [1].

Quand on regarde un même corps peu éloigné, successivement avec chaque œil, on en aperçoit l'*ensemble* sous deux aspects différents : avec l'un des yeux, les positions relatives des lignes ne sont pas les mêmes qu'avec l'autre, et l'on voit du côté de cet œil certaines parties du corps qu'on ne voit pas avec l'autre,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. II, p. 330.

les deux yeux n'étant pas situés de la même manière par rapport au corps. Par exemple, un cube sera vu comme en A (*fig.* 1601) quand on le regardera avec l'œil gauche, et comme en B, avec l'œil droit. Un tronc de cône ayant sa petite base tournée vers les yeux, sera vu comme en C avec l'œil gauche, et comme en D, avec l'œil droit (*fig.* 1602). Quand on regardera avec les deux yeux, les deux images faites sur les rétines ne seront donc pas identiques. On distinguera trois parties; la première, vue en même temps par les deux yeux, et dont les sensations se confondront, par les raisons que nous avons développées (2162); les deux autres, vues par un œil seulement, et qui s'ajouteront dans l'image, de part et d'autre de la partie commune. De la combinaison de ces diverses sensations résultera le sentiment des trois dimensions et du relief du corps. On voit que les deux yeux embrassent, pour ainsi dire, la surface des objets, de manière à en distinguer non seulement la partie antérieure, mais encore une portion des parties latérales. Cela ne pouvant avoir lieu sur un tableau peint, on comprend pourquoi les objets représentés sur le premier plan ne peuvent jamais produire une illusion complète; d'autant

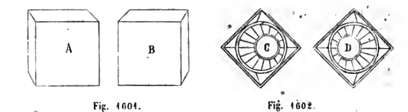


Fig. 1601. Fig. 1602.

plus qu'ils se projetteraient sur des objets éloignés différents pour les deux yeux, s'ils étaient réels, ce qui n'est pas réalisé sur le tableau. On supprime cette opposition entre l'effet du dessin et celui de la vision binoculaire des objets réels, en s'éloignant, auquel cas les images faites dans les deux yeux sont sensiblement identiques; ou bien en fermant un œil, ce que l'on fait instinctivement quand on veut bien juger de l'effet d'une peinture.

2169. Stéréoscope. — En partant des principes qui précédent, M. Wheatstone s'est proposé de faire voir en relief des dessins, faits sur une surface plane, d'objets à trois dimensions. On commence par préparer deux dessins de l'objet, l'un le représentant tel qu'on le voit avec l'œil droit, l'autre tel qu'on le voit avec l'œil gauche; et il faut faire en sorte que, celui de droite étant vu par l'œil droit seulement, et celui de gauche, par l'œil gauche, les deux dessins paraissent superposés. Pour remplir ces conditions, les dessins sont placés sur deux tablettes verticales parallèles *ab*, *a'b'* (*fig.* 1603) entre lesquelles sont disposés deux miroirs plans *mn*, *m'n* formant un angle de 90°. Un écran *e*, présentant des échancrures, *o*, *o'* pour les yeux, et *n'n* pour le nez, cache l'arête d'intersection des deux miroirs. La *figure* 1604 représente la projection horizontale de l'instrument. Les rayons lumineux, partant des

dessins d et d', vont faire leur image virtuelle et symétrique en D. On fait en sorte que ces images se superposent, en faisant glisser convenablement sur elles-mêmes les tablettes ab, $a'b'$. Alors l'illusion est si frappante qu'on croit voir un objet réel à trois dimensions. L'appareil porte le nom de *stéréoscope de réflexion*. Comme les images sont symétriques des dessins, il faut avoir soin de placer à gauche le dessin représentant l'objet tel qu'il est vu de l'œil droit, et réciproquement.

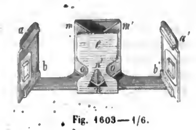


Fig. 1603 — 1/6.

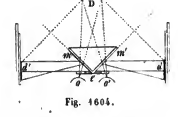


Fig. 1604.

Stéréoscope de réfraction. — Cet instrument, devenu si populaire, depuis que M. Brewster, son inventeur, eut chargé en 1850 MM. Soleil et Dubosc de le construire, est représenté dans la *fig.* 1606. La *fig.* 1605 en représente une coupe par un plan passant par la ligne des yeux. Considérons d'abord deux prismes p, p', opposés par leur angle, qui est très aigu, et soient d, d' les deux figures formant ce que l'on appelle un *dessin stéréoscopique*. Les yeux étant placés en o, o', chacun d'eux ne verra qu'un seul des deux dessins, parce qu'il y a un écran qui s'étend du sommet des prismes à la ligne de séparation des deux dessins. Les rayons lumineux qui traverseront les prismes, seront déviés sans dispersion sensible, de manière que les images des points d, d' se superposeront en D, où l'on verra l'image en relief de l'objet dessiné.

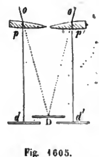


Fig. 1605.

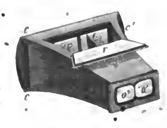


Fig. 1606. — 1/8.

Au lieu de prismes, M. Brewster met en p, p' deux portions d'une même lentille convergente, de manière que l'image est grossie comme par une loupe, et éloignée à la distance de la vision distincte.

Dans la *figure* 1606 les lettres sont les mêmes que dans la précédente. L'intérieur de la boîte est noirci; e est l'écran qui sépare les deux dessins, et r une petite porte garnie d'une feuille d'étain, que l'on incline de manière à réfléchir de la lumière sur le dessin. Le fond de la boîte est fermé par une lame de

verre dépoli, de manière qu'on peut éclairer par derrière les dessins translucides, en tournant ce fond du côté du jour.

L'inégalité des images faites dans les deux yeux et les effets du stéréoscope qui en sont une application, ont été présentés comme formant une objection à la théorie des *points identiques* qui sert à expliquer la fusion des impressions dans la vision binoculaire (2162). Mais il ne faut pas oublier qu'on ne voit nettement que les points du corps, ou du dessin stéréoscopique, qui sont très rapprochés du point de rencontre des axes des yeux. En second lieu, il y a, dans les images faites sur les deux rétines, une partie commune, à laquelle s'applique sans difficulté la théorie des points identiques. Quant à la partie que l'œil droit voit seul à droite de l'objet, son image n'existe que dans cet œil ; il en est de même de la partie que l'œil gauche voit seul à gauche de l'objet ; il n'y a donc pas de raison pour que ces parties soient vues doubles, puisqu'elles n'existent que sur une des rétines. Il peut arriver, du reste, que la partie commune des deux images n'existe pas ; par exemple, si dans l'un des dessins il y a une droite verticale, et dans l'autre une droite correspondante un peu oblique, les images de ces droites se fusionneront dans la sensation. et l'on verra une seule droite s'élevant ou s'abaissant par rapport au plan du dessin. Si les deux droites étaient trop écartées, elles seraient vues séparément, les images faites dans les deux yeux ne se confondant plus. Par exemple, si l'un des dessins représente un triangle et l'autre un carré, on verra ces deux figures superposées. Si les deux dessins représentent des parties différentes d'un même sujet, ces parties se verront en même temps dans le stéréoscope, et le sujet sera complété. — Ajoutons qu'il y a des personnes qui ne peuvent jouir de l'illusion du stéréoscope ; Arago était dans ce cas. Cela tient probablement à l'inégalité de sensibilité des deux yeux.

2170. Modifications et applications du stéréoscope. — Pendant longtemps on n'a guère employé dans le stéréoscope, que des dessins représentant des corps de forme simple, comme des cylindres, des polyèdres. Depuis, la photographie a fourni le moyen de faire des dessins stéréoscopiques avec une exactitude de perspective absolue, et l'on trouve aujourd'hui dans le commerce des doubles dessins de statues, groupes, monuments, vues, paysages, et même de portraits, dans lesquels on distingue au stéréoscope les reliefs , les différents plans, etc., comme si l'on voyait la réalité. Tantôt on exécute les deux photographies l'une après l'autre, en changeant la position du daguerréotype ; tantôt, comme pour les portraits, on emploie deux appareils, fonctionnant simultanément, et dont les axes doivent être d'autant plus écartés que les objets sont plus éloignés. L'écart doit être tel que l'angle des axes des chambres noires soit égal à celui que forment les axes des yeux, quand on regarde un point placé à la distance où se forment les images superposées. Du reste, il est à remarquer que l'écart des deux daguerréotypes peut varier notablement, sans que les images obtenues cessent de produire dans le stéréoscope

l'illusion qu'on en attend ; aussi dispose-t-on ordinairement les appareils approximativement.

Ainsi aidé du secours de la photographie, le stéréoscope est susceptible de nombreuses applications. Les portraits stéréoscopiques sont devenus populaires en Allemagne. Dans le même pays on a publié des ouvrages scientifiques à figures stéréoscopiques, sur la géologie. Un stéréoscope, en forme de double lorgnette de spectacle, inventé par M. Duboscq, est joint à chaque exemplaire. — On peut, au moyen du stéréoscope, voir en relief et grossis, les petits objets d'histoire naturelle photographiés sous deux points de vue, et projetés sur un écran, au moyen d'une lentille, comme dans le microscope solaire. On emploie, dans ce cas, un stéréoscope à réflexion totale, dû à M. Brewster et construit par M. Duboscq. Les rayons, partis des dessins *d*, *d'* (*fig.* 1607), se réfléchissent en *r*, *r'* dans les deux prismes P, P', et viennent en *o*, *o'*, où sont placés les yeux, de manière que les prolongements de ces rayons se rencontrent en D, où les images se superposent. Des lentilles *l*, *l'* servent à grossir les images observées, et en faisant varier leur distance aux prismes, on ajuste l'instrument pour chaque vue, d'après la distance du dessin. Il est à remarquer que la réflexion donnant aux images une position symétrique, on doit placer du côté gauche l'image destinée à l'œil droit, et réciproquement.

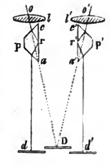


Fig. 1607.

Stéréoscope panoramique. — Les deux dessins devant être placés l'un à côté de l'autre, ils ne peuvent avoir que de faibles dimensions dans le sens latéral. Pour les monuments, les vues qui s'étendent beaucoup en largeur, M. Duboscq a imaginé différents *stéréoscopes panoramiques*. Considérons, par exemple, le stéréoscope (*fig.* 1606) dans lequel on introduirait les deux dessins perpendiculairement à la ligne des yeux, ou au côté *cc'*, le bas de chaque dessin étant tourné du côté *cc*. En faisant glisser ces deux dessins, on en verra successivement les différentes parties, mais elles seront couchées ; il faudrait donc les faire tourner de 90° dans leur plan ; c'est ce que l'on fait au moyen de deux prismes semblables aux prismes P, P' (*fig.* 1607) et tournés de manière que les faces *ac*, *a'c'* soient inclinées convenablement par rapport au plan *oDo'*, tout en restant verticales.

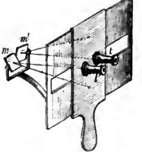


Fig. 1608.

La *figure* 1608 représente une autre disposition : les deux bandes dessinées sont appliquées l'une au-dessus de l'autre derrière l'écran *ab*. On regarde à

travers deux tubes t, t' leur image réfléchie dans deux miroirs plans m, m', inclinés de manière que les rayons réfléchis passent par les deux tubes, et que les deux images paraissent superposées. Les tubes et le système des miroirs peuvent glisser de manière à permettre d'explorer successivement les différentes parties du dessin.

Phénakisticope stéréoscopique. — Les deux bandes représentant un même sujet dans différentes attitudes successives et se correspondant sur les deux bandes, supposons qu'on les fasse passer rapidement devant les tubes t, t', et qu'on regarde dans les miroirs m, m', à travers des ouvertures pratiquées entre ces bandes, et en nombre égal aux doubles figures ; on verra le sujet se mouvoir, en même temps qu'il semblera être à trois dimensions. Au lieu de bandes, on emploie un cylindre de carton, dans l'intérieur duquel sont les miroirs m, m', et qui porte en dedans la double série de dessins, au milieu de laquelle est pratiquée la rangée de trous. On réunit ainsi les effets du stéréoscope et ceux du phénakisticope.

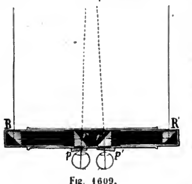


Fig. 1609.

Télestéréoscope. — Quand on regarde des objets éloignés, les images formées dans les deux yeux ne diffèrent pas sensiblement; il faudrait, pour qu'elles fussent différentes et que la double vision aidât à l'appréciation des reliefs, que les yeux fussent très écartés l'un de l'autre. M. Helmoltz arrive au même résultat au moyen de deux miroirs obliques, éloignés l'un de l'autre, et renvoyant les rayons partis de l'objet dans deux autres miroirs rapprochés, qui les réfléchissent dans les deux yeux. Cet ensemble forme le *télestereoscope*; il fait voir en relief les objets éloignés qui, à l'œil nu, paraissent sans relief. La *figure* 1609 relative à un appareil construit sur le principe du télestéréoscope nous en donnera une idée plus complète.

Cet appareil a été imaginé par M. F. Giraud-Teulon[1]. R,R sont deux prismes éloignés, qui renvoient, par réflexion totale, les rayons partis de deux dessins, sur deux autres prismes r,r' qui les ramènent, aussi par réflexion totale, dans les yeux *appliqués à un stéréoscope*, dont p,p' sont les deux prismes. Avec cet appareil, plusieurs personnes peuvent observer des doubles dessins de grandes dimensions. On n'a plus besoin de grossir, ce qui a l'inconvénient de faire ressortir les défauts et produit cette apparence de plâtre qui est si désagréable avec les doubles dessins photographiques.

2471. Pseudoscope stéréoscopique. — Quand on place du côté gauche, dans le stéréoscope, le dessin destiné à l'œil droit, et du côté droit celui qui

[1] *Physiologie et pathologie fonctionnelle de la vision binoculaire*, p. 622.

est destiné à l'œil gauche, les reliefs de l'objet dessiné paraissent en creux, et réciproquement. Par exemple, le tronc de cône (*fig.* 1602) devient un vase dont on voit l'intérieur. On a ainsi ce que M. Wheatstone appelle une *figure inverse*. Il n'y a pas cependant inversion complète dans tous les cas, les parties qui paraissent les plus éloignées se trouvant, dans la figure inverse, plus grandes que les plus rapprochées, quand elles sont en effet tracées plus grandes, parce qu'elles devaient être en avant dans l'image directe. Par exemple, un cube n'est pas remplacé par un bassin cubique, mais par un tronc de pyramide dont la grande base occupe le fond. Le stéréoscope fonctionne alors comme *pseudoscope*. On peut sans instrument obtenir l'effet du stéréoscope, en louchant de manière que les deux dessins se superposent ; mais on a ainsi la figure *inverse*, parce que, dans les images superposées, le dessin du gauche est vu par l'œil droit, et celui de droite par l'œil gauche, comme on peut s'en assurer en fermant un œil.

Le *pseudoscope* est destiné à donner des inversions quand on regarde des objets réels, c'est-à-dire à faire paraître en creux ce qui est en relief, et en relief ce qui est en creux. Il suffit pour cela d'employer le système des prismes P P′ de la *figure* 1687, en les inclinant de manière à rapprocher les points *a*, *a′* et à éloigner *c*, *c′*. Chaque œil verra alors l'image, rendue symétrique par la réflexion, de l'objet placé en D ; ces deux images étant superposées, et la partie qui serait vue à droite, à l'œil nu, étant à gauche, et réciproquement, on voit une image *inverse* de l'objet. Avec cet instrument, un globe semble être une coupe hémisphérique, une médaille paraît gravée en creux ; au lieu d'une statue, on croit voir son moule. Cependant, comme le sentiment du relief dépend d'autres conditions que du concours des deux yeux, il peut arriver que les objets soient vus dans leur état réel, puis ils se transforment subitement, pour changer de nouveau ; produisant ainsi les effets les plus étranges, et d'autant plus surprenants, que n'étant pas soumis à la volonté, les renversements se manifestent au moment où l'on s'y attend le moins.

VI. Appréciation des couleurs. — Couleurs accidentelles.

2172. Jugement des couleurs. — Il est facile de concevoir que les rayons de couleurs différentes impressionnent la rétine d'une manière différente. Mais ce n'est encore qu'après de nombreuses comparaisons que l'on finit par sentir les différences qui existent entre les couleurs, et à en graver les impressions dans la mémoire, de manière à pouvoir les reconnaître par la suite. L'aveugle de Cheselden ne put, pendant quelque temps, trouver de différence entre les couleurs.

Des impressions de couleurs différentes faites dans les deux yeux par un objet en plaçant des verres de couleur différente devant les yeux, se fusionnent de manière à présenter la nuance qui résulte du mélange des couleurs. Cela se

voit facilement aussi avec le stéréoscope, au moyen de deux disques de papier de couleur différente. M. Dove [1] a remarqué que, si les disques sont des verres colorés éclairés par transmission, on ne voit ordinairement qu'une seule couleur. Il y a donc une différence entre la lumière colorée réfléchie et celle qui est transmise. Si l'on place dans le stéréoscope un double dessin linéaire, représentant les arêtes d'un solide, et que les lignes des deux dessins soient de couleur différente sur fond noir, on voit le relief; mais les arêtes, au lieu de présenter la nuance résultant du mélange des deux couleurs, se montrent formées en deux lignes contiguës présentant chacune la couleur du dessin qui se trouve du côté opposé. En même temps les faces du solide, au lieu d'être noires, sont comme glacées et d'une teinte résultant du mélange des deux couleurs des arêtes. Par exemple, en mettant un verre bleu foncé devant un œil et un verre rouge devant l'autre, les deux dessins étant en traits blancs sur fond noir, les faces sont illuminées d'une lumière violette. Si l'un des dessins est en lignes noires sur fond blanc, les arêtes sont formées d'un trait blanc contigu à un trait noir, et les faces présentent l'aspect de la plombagine. M. Dove attribue ces effets singuliers au chromatisme des yeux, qui tendent à se mettre dans un état différent pour voir chacune des couleurs (2143)

2173. Achromatopsie. — Il y a des personnes qui ne peuvent distinguer les couleurs : la plupart leur paraissent grises, brunes ou jaunes. Tantôt cette inaptitude s'étend à toutes les couleurs, excepté peut-être au jaune; tantôt elle n'est relative qu'à quelques couleurs seulement; tantôt, enfin, il n'y a que les nuances différant peu qui sont confondues. Les annales de l'Académie des sciences font mention de toute une famille qui ne distinguait pas le rouge du vert; pour elle, les fleurs du grenadier, les fruits du cerisier ne différaient des feuilles que par la forme. Dalton était dans ce cas, d'où le nom de *daltonisme* donné souvent à l'*achromatopsie*. Herschel cite un individu qui voyait tous les corps colorés, jaunes ou bleus ; les rayons les plus réfrangibles produisaient la sensation qu'il nommait *le bleu*, et les moins réfrangibles, celle qu'il nommait *le jaune*. M. Seebeck jeune et M. d'Hombres Firmas [2] ont fait beaucoup d'observations sur ce défaut de la vue, qui paraît être inné et souvent héréditaire; il est plus commun qu'on ne croit; car on a vu des individus arriver à un âge assez avancé sans se douter qu'ils ne voyaient pas comme tout le monde. — On a cherché à expliquer l'achromatopsie, en supposant que ce ne sont pas les mêmes fibres nerveuses de la rétine qui sont impressionnées par les divers rayons colorés; de même que, dans une harpe, ce ne sont pas les mêmes cordes qui vibrent sous l'influence des sons produits à proximité. L'achromatopsie serait alors due à l'absence partielle ou complète, de la sensibilité des fibres qui correspondent aux couleurs qui ne peuvent être distinguées.

2174. COULEURS ACCIDENTELLES. — On nomme ainsi des apparences visuelles

[1] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des Sc.), t. XV, p. 219; et t. XVI, p. 209.

[2] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XXIX, p. 175; et XXX, p. 57 et 376.

qui succèdent à la contemplation d'objets vivement éclairés. Jurin, puis Buffon, les ont les premiers étudiées scientifiquement.

1° Si l'on regarde pendant quelque temps un corps vivement coloré placé sur un fond noir, ce corps paraît perdre peu à peu de son éclat, et si alors on porte rapidement les yeux sur une surface blanche, on aperçoit une tache de même forme que l'objet et de couleur complémentaire. Par exemple, si, comme l'a fait Scherffer, en 1785, on peint un portrait de couleur verdâtre, avec les cheveux blancs, les prunelles blanches et les dents noires, on le verra avec les couleurs ordinaires, quand, après l'avoir longtemps regardé, on portera les yeux sur un fond blanc. — 2° Si, au lieu de regarder une surface blanche, on ferme les yeux, en ayant soin de couvrir les paupières, on voit les couleurs accidentelles se manifester, disparaître, puis reparaître plusieurs fois de suite. Si l'on a regardé un objet blanc sur un fond noir, on voit ensuite une tache noire sur fond blanc. C'est ce qui a lieu quand on regarde une croisée fermée recevant un jour vif; on voit, en fermant les yeux, une croisée dont les barreaux sont blancs et les carreaux noirs. — 3° Si la surface sur laquelle on porte la vue n'est pas blanche, mais colorée, la nuance que l'on aperçoit est celle que produirait le mélange de la couleur de la surface avec la couleur complémentaire de l'objet qu'on a regardé d'abord. Les couleurs accidentelles se combinent donc avec les couleurs naturelles, suivant les mêmes lois que ces dernières entre elles.

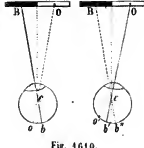


Fig. 1610.

Deux couleurs accidentelles différentes se combinent aussi suivant les mêmes lois, comme le prouve l'expérience suivante, due à Scherffer : on place l'un à côté de l'autre sur un fond noir, deux carrés égaux en papier, présentant des couleurs différentes, par exemple l'un *bleu*, l'autre *orangé*. On regarde alternativement une quarantaine de fois, en s'arrêtant environ deux secondes sur chacun, un point noir marqué au milieu de chaque carré. On porte ensuite les yeux sur un fond blanc, et l'on voit trois carrés, dont les extrêmes sont de la couleur complémentaire des carrés qui étaient du même côté, tandis que celui du milieu présente la nuance qui résulte du mélange des couleurs des deux autres. Pour expliquer ce résultat, soient B et O les deux carrés (*fig.* 1610) quand on regarde B, son image se fait en *b* sur l'axe Bc de l'œil, et celle du carré O se fait en *o*. Si ensuite l'œil tourne autour du point *c* pour regarder le carré O, le point *b* de la rétine viendra en *b'*, et le point *o*, en *o'*. L'image de O se fera alors en *b'*, où se trouvait l'image de B dans la première position de l'œil, et l'image de B se fera maintenant en *b"*. Il y a donc trois points de la rétine impressionnés, et celui du milieu par deux impressions successives superposées. — Si les deux carrés ont des couleurs complémentaires, celui du

milieu disparaît ; mais si l'on fait l'expérience en se couvrant les yeux, on voit les trois carrés, et celui du milieu est *noir*. Ainsi, le mélange des deux couleurs accidentelles complémentaires forme du *noir*, et non du blanc comme les couleurs naturelles.

2175. Théorie des couleurs complémentaires. — Depuis Jurin, on a fait un grand nombre d'hypothèses pour expliquer les couleurs accidentelles. Dans celle du P. Scherffer, longtemps adoptée, avec quelques modifications, on suppose que la rétine, après avoir éprouvé l'action prolongée des rayons d'une certaine couleur, a perdu de sa sensibilité pour cette couleur, de sorte que si l'on regarde un fond blanc, elle n'est plus sensible qu'aux rayons autres que ceux qui l'ont affectée d'abord ; elle perçoit donc la couleur que produit le blanc dépourvu de ces sortes de rayons, c'est-à-dire la couleur complémentaire. Mais les apparences accidentelles se montrent dans l'obscurité *la plus complète*, et quand on regarde une surface de couleur *simple* différente de celle qu'on a d'abord regardée, cette couleur paraît toujours modifiée. Les apparences sont donc subjectives, c'est-à-dire engendrées dans l'œil même, indépendamment de toute action extérieure.

M. Plateau a donné une nouvelle théorie des apparences accidentelles[1]. Il commence par établir que : 1° l'impression directe produite dans l'œil persiste quelque temps après qu'on l'a fermé. Cette persistance se reconnaît facilement quand on n'a pas regardé trop longtemps l'objet lumineux ; elle est d'autant plus courte que la rétine a été plus fatiguée par une contemplation prolongée, et alors la persistance peut passer inaperçue, l'apparence accidentelle se manifestant presque aussitôt qu'on ferme les yeux. 2° L'apparence accidentelle est de nature opposée à l'impression directe. Ainsi, quand on regarde un corps blanc, l'apparence qui le remplace est noire, et réciproquement ; quand deux couleurs réelles produisent du blanc par leur réunion, les couleurs accidentelles complémentaires qui les remplacent produisent du *noir*, qui est l'opposé du blanc ; une couleur réelle est remplacée par sa couleur complémentaire, et l'on peut dire qu'il y a *opposition* entre deux semblables couleurs, puisqu'elles se neutralisent en formant du blanc.

Cela posé, quand la rétine a été impressionnée par la lumière, elle ne revient pas brusquement à l'état de repos, comme le prouve la persistance de l'impression ; or, on peut concevoir qu'elle y revienne de deux manières : soit graduellement, l'impression s'effaçant peu à peu ; soit par des espèces d'oscillations, d'où résulterait la succession alternative d'impressions opposées de moins en moins intenses, comme un pendule, qui n'arrive à sa position d'équilibre qu'après un certain nombre d'oscillations. Cette seconde manière de voir explique la plupart des phénomènes. Ainsi, la rétine d'abord impressionnée directement, résiste de plus en plus à cette impression, qui se développe progressivement (2157), ce qui fait que l'éclat d'un objet que l'on regarde pendant longtemps

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LVIII, p. 337.

paraît s'affaiblir. Puis, quand la rétine est soustraite brusquement à cette impression, elle réagit et se met dans l'état opposé, d'autant plus rapidement que l'impression a duré plus longtemps. De là les alternatives remarquées par différents observateurs, dans lesquelles l'image accidentelle disparaît et reparaît plusieurs fois de suite. M. Plateau a même pu voir l'image *directe* reparaître plusieurs fois, de manière à produire avec l'image accidentelle jusqu'à neuf alternatives. Pour obtenir ce résultat, on regarde avec un seul œil, à travers un tube noirci et pendant une minute au moins, une partie d'un papier rouge bien éclairé, on enlève le tube, et l'on regarde une surface blanche; on voit d'abord une image verte, bientôt remplacée par une tache rouge faible et de peu de durée, à laquelle succède une image verte; et ainsi de suite. En fermant l'œil sans retirer le tube, on voit aussi cette succession de couleurs, mais d'une manière un peu moins distincte,

La théorie de M. Plateau rend bien compte des principales apparences accidentelles; mais il en est d'autres, observées par MM. Fechner, Brucke[1], J.-M. Seguin[2] qu'elle ne peut expliquer. Par exemple, quand on a regardé un disque coloré sur un fond noir, l'image subjective est plus obscure que l'espace qui l'environne; il faut donc tenir compte de la fatigue de la rétine. Si l'on regarde un rond blanc sur fond noir éclairé par le soleil, l'image subjective d'abord verte, passe au bleu, au violet, puis au rouge foncé. M. Séguin a remarqné des zones colorées et concentriques, qui se resserrent peu à peu en s'avançant vers le centre avant de disparaître. Le même physicien a aussi constaté que l'image complémentaire peut se former pendant la contemplation, sur la surface même de l'objet, et persister quand on ferme les yeux. Au reste, ces images subjectives dépendent de l'éclat de l'objet, de la durée de la contemplation, et probablement aussi des yeux de celui qui expérimente. Ajoutons que ces expériences ne sont pas sans danger pour la vue, comme ne l'atteste que trop la cécité dont ont été frappés MM. Plateau et Feschner, à la suite de longues recherches sur la vision. — Du reste, l'étude des images subjectjves est du ressort de la physiologie plutôt que de la physique; nous ne nous en occuperons donc pas davantage.

2176. Auréoles accidentelles. — Ces sortes de couleurs accidentelles, étudiées avec détail par Buffon, diffèrent de celles dont nous venons de parler, en ce qu'elles se manifestent pendant qu'on regarde le corps coloré qui les fait naître. Supposons qu'on regarde fixement un disque coloré appliqué sur un fond blanc, au bout de quelque temps, on voit apparaître autour du disque, une auréole faible ayant une couleur complémentaire. Si le disque est blanc sur un fond coloré, il présente à son tour la couleur complémentaire du fond. C'est à un phénomène analogue qu'il faut rapporter les couleurs que présentent les ombres dans certaines circonstances. Léonard de Vinci avait remarqué que les

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. XIX, p. 122.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, p. 413.

ombres au soleil couchant, dont les rayons sont plus ou moins rougeâtres, paraissent bleues. Buffon a constaté le même fait. Il a observé souvent que les ombres portées sur un mur blanc étaient azurées, le soleil couchant étant jaune. Une fois, les ombres furent d'un vert bleuâtre, mais le soleil était alors coloré en rouge-orangé.

Prieur de la Côte-d'Or avait voulu attribuer ces phénomènes à des effets de contraste ; mais les auréoles se manifestent quand le corps coloré est posé sur un fond noir. M. Plateau a étendu aux auréoles, l'ingénieuse théorie qui lui a servi à expliquer les couleurs accidentelles. Quand on regarde un objet vivement éclairé, l'impression produite sur la rétine dépasse les limites de l'image, ce qui forme l'irradiation (2174), qui s'affaiblit à mesure qu'on s'éloigne du bord de l'image géométrique, et devient nulle à une certaine distance. Au-delà, les points de la rétine se constituent dans un état opposé, de même que dans une plaque vibrante les mouvements sont en sens contraire de part et d'autre d'une ligne de repos. Ce principe est, pour l'espace, ce qu'est pour le temps celui qui sert à expliquer les couleurs accidentelles successives. Du reste, M. Plateau a observé des alternatives qui viennent confirmer cette explication ; il a vu l'auréole, bordée d'une auréole secondaire de la même couleur que le corps. Par exemple, quand on place une bande de carton blanc sur un papier rouge translucide éclairé par derrière, la bande paraît verte, et si elle est assez large, elle paraît rougeâtre au milieu.

2177. Du contraste simultané des couleurs. — Il résulte de la formation des auréoles accidentelles, que deux teintes ou deux couleurs voisines s'influencent mutuellement et ne produisent pas le même effet que lorsqu'elles sont éloignées l'une de l'autre. Par exemple, si l'on juxtapose des bandes couvertes d'une teinte plate à l'encre de Chine, mais de plus en plus foncées quand on passe de l'une à l'autre, chacune de ces bandes paraîtra plus foncée du côté de la bande plus claire contiguë, et plus claire du côté de la bande plus foncée. Si l'on juxtapose deux bandes de couleur différente, et qu'on place à une certaine distance des bandes de même couleur pour servir de terme de comparaison, on reconnaît que la couleur de chacune des bandes contiguës est modifiée par le voisinage de l'autre. Par exemple, si les bandes sont rouge et jaune, la première prendra du violet et la seconde un peu de vert. M. Chevreul a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences, qu'il a rassemblées dans un ouvrage spécial [1], où il fait connaître le parti que peuvent tirer une foule d'industries des lois du contraste simultané. Voici quels sont les principaux résultats fournis par l'expérience : 1° Quand deux couleurs sont juxtaposées, la nuance de chacune d'elles est modifiée par le mélange avec la couleur complémentaire de l'autre. 2° Si les couleurs contiguës sont complémentaires, chacune d'elles paraît plus vive et plus pure ; car elle est mêlée de la couleur complémentaire de l'autre, qui est sa propre nuance. 3° Si l'une des couleurs est

[1] *De la loi du contraste simultané des couleurs*, etc. ; Paris, 1839.

remplacée par du blanc ou du noir, l'autre est entourée d'une auréole de sa couleur complémentaire et paraît plus vive. 4° Ces effets ont encore lieu, mais d'une manière moins prononcée, quand les couleurs ne sont pas contiguës.

M. Chevreul résume en un seul énoncé *la loi du contraste simultané des couleurs* : « Dans le cas où l'œil voit en même temps deux couleurs contiguës, il les voit les plus dissemblables possible, quant à leur composition optique et quant à la hauteur de leur ton. » Le contraste peut donc porter à la fois sur la *nuance* et sur le *ton*.

§ 2. — VISION AIDÉE DES INSTRUMENTS GROSSISSANTS.

I. Microscopes.

2178. Jusqu'à la fin du XVIe siècle, l'organe visuel est resté abandonné à ses seules ressources. Depuis, l'optique lui a fourni des instruments précieux qui en ont singulièrement étendu les facultés. Les uns, en accroissant sa portée, ont considérablement agrandi le champ de l'astronomie, en permettant de pénétrer dans l'espace, d'y découvrir une multitude d'astres jusque-là inconnus, et d'étudier la constitution de ceux qui étaient déjà connus; les autres ont permis de distinguer une multitude d'êtres vivants d'une excessive petitesse, dont on ne soupçonnait pas même l'existence; et, en permettant de pénétrer dans les détails les plus élémentaires des organismes, ont fourni à l'histoire naturelle un puissant moyen d'investigation. Nous allons d'abord nous occuper de ces derniers instruments.

2179. Loupe ou microscope simple. — Le microscope est destiné à venir en aide à notre vue pour nous faire distinguer des objets dont le diamètre apparent, quand ils sont placés à la distance de la vision distincte, est tellement petit qu'on ne peut discerner les détails de l'image formée sur la rétine. Il existe deux espèces de microscopes : le *microscope simple* ou *loupe*, et le *microscope composé*.

La *loupe* consiste simplement en une lentille convergente à court foyer, destinée à faire voir les objets grossis. Pour obtenir ce résultat, il faut que l'objet soit placé entre la lentille et son foyer principal, et très près de ce dernier. Soit *ab* (*fig.* 1611) un très petit objet ; il faudrait, pour le voir sous un diamètre apparent suffisant, l'approcher très près de l'œil ; mais alors la vision serait confuse. On pourrait éviter cet inconvénient en interposant un écran percé d'un très petit trou, de manière que le cercle de dissipation de chaque point lumineux sur la rétine devînt négligeable. Mais alors l'image aurait un éclat si faible qu'on ne pourrait la distinguer. Il faudrait donc, tout en conservant aux faisceaux une grande section, et plaçant l'objet très près de l'œil, donner aux rayons qui entrent par la pupille, le même degré de divergence

que s'ils partaient de la distance de la vision distincte. C'est ce qu'on réalise en interposant entre l'œil et l'objet une lentille convergente dont le foyer *f* est un peu au-delà de l'objet. C'est précisément ce que font les presbytes, et nous sommes tous presbytes pour les objets très rapprochés. Dans cette position de l'objet, le foyer des rayons partant de chacun de ses points est virtuel et situé plus loin de la lentille, du même côté (1987). Il en résulte qu'il se forme quelque part en AB une image droite et virtuelle de l'objet *ab*. On construit cette image en joignant les extrémités *a* et *b* de l'objet, au centre optique *o* de la lentille, et prenant les distances *o*A, *o*B égales aux valeurs de p' données par la formule des lentilles, quand on remplace p par les distances *oa* et *ob* (1984). Les rayons qui traversent la lentille en sortent alors avec le même degré de divergence que s'ils partaient des divers points de l'image virtuelle AB ; et si la distance AC est convenable, on verra cette image virtuelle comme si elle était un objet réel.

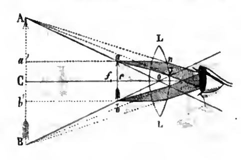


Fig. 1611.

Il est facile de construire le faisceau qui, partant d'un point *a* de l'objet *ab*, fait voir l'image A de ce point. On commence par joindre le point A au contour de la pupille ; on obtient ainsi un cône A*ni*, qui rencontre en *ni* la surface antérieure de la lentille. Joignant ensuite les points *n* et *i* au point *a*, et négligeant l'épaisseur de la lentille, on obtient les limites du faisceau incident *ani*, qui entre dans l'œil et fait voir l'image virtuelle A. Ce faisceau est ombré dans la figure, ainsi que celui qui fait voir l'image B du point *b*.

La distance de l'objet à la loupe, quand elle a un court foyer, doit, pour que l'image soit nette, être renfermée entre des limites très rapprochées. Si, en effet, on éloigne un peu l'objet, il dépasse bientôt le foyer principal, dont il est très près, et il ne se forme plus d'image virtuelle. Si l'objet se rapproche de la loupe, l'image virtuelle s'en rapproche aussi et très rapidement (1987), et la distance OC devient moindre que celle de la vision distincte. On pourra cependant voir encore nettement, en éloignant l'œil de la lentille.

2180. Calcul du grossissement. — Le grossissement de la loupe est le rapport entre les diamètres apparents de l'image AB et de l'objet placé à la même distance *o*C. Or, si l'objet était en *a'b'*, *à la distance de la vision distincte*, son diamètre apparent serait *a'ob'*, si nous négligeons la distance de l'œil à la loupe. Le grossissement *en diamètre* est donc représenté par le rapport des angles A*o*B et *a'ob'* ou sensiblement par celui des longueurs AB et $a'b' = ab$. Représentons par d la distance *o*C de la vision distincte, par f la distance focale *of* de la lentille, et supposons que la distance de l'objet à la lentille soit

égale à of dont elle diffère très peu; les triangles aco et ACo donneront $\frac{AC}{ac}=\frac{AB}{ab}=\frac{d}{f}$. Le grossissement est donc sensiblement égal au rapport de la distance de la vision distincte à la distance focale principale de la lentille. Il sera d'autant plus grand que la lentille aura un foyer plus court, et que la vue de l'observateur sera plus longue. Les loupes très grossissantes devront donc être très petites, pour avoir un foyer très court tout en ne présentant pas une trop grande aberration de sphéricité (1993). — Quand on a le grossissement en diamètre, on en déduit le grossissement en surface, en en prenant le carré.

2181. Différentes espèces de loupes. — On a adopté, dans la construction des microscopes simples, différentes dispositions destinées à éviter l'aberration de sphéricité, ou à les approprier à divers usages.

Pour diminuer l'aberration de sphéricité, on applique sur la lentille un diaphragme qui arrête les rayons tombant près du bord. Ce diaphragme diminue

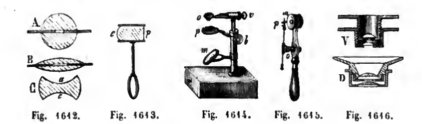


Fig. 1612. Fig. 1613. Fig. 1614. Fig. 1615. Fig. 1616.

le champ de la loupe, c'est-à-dire l'espace angulaire dans lequel doivent être compris les objets pour être aperçus.

Loupes périscopiques. — Pour augmenter le champ, Wollaston partage la lentille en deux, comme on le voit en A et B (*fig.* 1612), et il introduit le diaphragme entre les deux moitiés. De cette façon, il ne passe que des rayons voisins du centre optique, et cependant le champ reste considérable.

Lentille Coddington. — Il se perd de la lumière par réflexion à la face plane de chaque partie de la lentille; il vaudrait donc mieux la faire d'une seule pièce; mais comme il serait difficile d'y tailler la fente circulaire dans laquelle devrait être engagé le diaphragme, on a remplacé ce dernier par le contour même de la lentille, dans l'épaisseur de laquelle on creuse une gorge ac (*fig.* 1612), dont le fond a, c, limite les faisceaux transmis.

Doublet. — On nomme ainsi des microscopes simples dans lesquels deux lentilles sont associées pour produire le même effet qu'une seule, mais avec moins d'aberration de sphéricité (1853). V (*fig.* 1616) est le *doublet de Wollaston*. Les deux lentilles sont plan-convexes et leur surface plane est tournée du côté de l'objet; on peut les rapprocher plus ou moins l'une de l'autre au moyen d'un pas de vis, de manière à faire disparaître toute aberration. Malheureusement le foyer est tellement court, qu'on ne peut graver ou

disséquer sous ce microscope. Dans le *doublet de Ch. Chevalier* (*fig.* 1616) le foyer est plus long, les deux lentilles sont fixes, et elles sont séparées par un diaphragme.

Microscope de Raspail. — Cet instrument consiste en un microscope simple *o* (*fig.* 1614) soutenu par un support qui peut s'allonger au moyen d'un pignon denté *b* et d'une crémaillère. L'objet se met sur une lame de verre posée sur une plaque de cuivre percée, *p*, nommée *porte-objet*. Comme l'image est d'autant plus faible qu'elle est plus grossie, la même quantité de lumière s'y trouvant répartie dans un espace d'autant plus grand, il faut que l'objet soit vivement éclairé. Pour cela, on concentre sur lui la lumière des nues ou d'une lampe, au moyen d'un miroir concave articulé *m*.

Microscope à main. — L'objet est fixé dans une pince *p* (*fig.* 1615) articulée en *o*. Un petit miroir concave, *m*, au milieu duquel est la lentille, réfléchit la lumière sur l'objet, qu'on tourne du côté du jour.

Microscope Stanhope. — Imaginons un cylindre de verre terminé d'un côté par une base plane *p*, et de l'autre par une surface sphérique convexe *c* (*fig.* 1613). Un petit objet collé sur la base plane, sera dans les mêmes conditions que s'il se trouvait dans l'intérieur de la masse de verre; et si l'on regarde par la surface convexe, on le verra grossi et droit, comme nous l'avons expliqué précédemment (1981). Il faudra seulement que la longueur *cp* soit un peu moindre que la distance à laquelle se fait le foyer des rayons parallèles entrant par la surface sphérique. Ce petit instrument peut grossir jusqu'à 80 fois, tout en conservant à l'image beaucoup de clarté et de netteté, et avec un champ plus grand que celui des autres espèces de microscopes simples.

On a fait avec des pierres précieuses, des loupes ayant un grand pouvoir réfringent, de manière qu'elles donnent un fort grossissement, avec des courbures peu prononcées, ce qui diminue l'aberration de sphéricité. — On se procure économiquement de fortes loupes, en fondant au chalumeau l'extrémité d'une mince tige de verre ; le verre s'amasse en une petite sphère, qu'il n'y a plus qu'à enchasser dans un diaphragme. On peut encore fondre un éclat de verre dans un petit trou d'une plaque métallique. Au verre, on peut substituer une goutte d'eau ou d'huile, ou mieux une goutte de baume de Canada, dont le pouvoir réfringent est considérable.

2182. La loupe paraît avoir été connue des anciens. Sénéque dit formellement que « des lettres, quelque petites et obscures qu'elles soient, paraissent plus grandes et plus distinctes quand on les regarde à travers une boule de verre remplie d'eau. » Cela nous explique comment ont pu être gravées les pierres fines qui nous viennent de l'antiquité. Les anciens paraissent avoir aussi connu les lentilles proprement dites. Nous avons cité un passage d'Aristophane, où il est question d'un verre ardent (II, 731), et mentionné une lentille de verre découverte dans un tombeau romain (1998). Nous ajouterons que M. Brewster a présenté à l'association britannique, en 1852, une lentille de cristal de roche, trouvée dans des fouilles faites à Ninive. Il serait

bien difficile d'admettre que, connaissant les lentilles, on n'ait pas remarqué leur propriété de grossir des objets. Cependant Alhazen, puis Bacon, ne parlent que du grossissement que produit un segment sphérique de verre *appliqué* sur l'écriture. Ce qui est certain, c'est que l'idée d'appliquer la loupe à l'étude de l'histoire naturelle ne s'est présentée que très tard. Les premières descriptions d'observations faites à la loupe ne datent que de 1625. Elles sont dues à F. Stellutin, qui étudia les organes des abeilles. Cependant, Fontana prétend avoir fait usage, le premier, du même instrument, dès 1618. C'est avec de simples loupes, qu'il fabriquait lui-même, que Leuwenhoeck a fait ses belles découvertes. Hartsoeker se servait de globules fondues au bout d'un fil de verre, dont il avait remarqué par hasard les propriétés optiques.

2183. Images réelles des lentilles convergentes. — Quand un objet *ac* (*fig.* 1617) est placé au-delà du foyer principal d'une lentille convergente, il forme, du côté opposé de cette lentille, une image réelle renversée

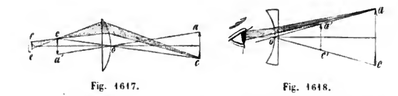


Fig. 1617. Fig. 1618.

c'a'. En chaque point de cette image se croisent les rayons partis du point correspondant de l'objet, de manière que si l'œil est placé en *ee* au-delà de l'image *c'a'*, à une distance égale à celle de la vision distincte, on verra l'*image aérienne c'a'* comme si elle était un objet lumineux, chacun de ses points envoyant des rayons divergents dans l'œil. On a ombré dans la figure le pinceau lumineux qui, partant du point *c*, fait voir l'image réelle *c'*.

2184. Vision à travers les lentilles divergentes. — Les lentilles divergentes donnent toujours des images virtuelles *plus petites* que l'objet ; par conséquent, elles rapetissent au lieu de grossir. Dans la *figure* 1618, on a ombré le faisceau lumineux qui, partant du point *a* de l'objet *ab*, entre dans l'œil et fait voir l'image *a'* de ce point.

2185. II. MICROSCOPE COMPOSÉ. — Dans le microscope composé, il y a deux lentilles ou systèmes de lentilles fonctionnant séparément. La première lentille *oo'* (*fig.* 1619) se nomme l'*objectif*, parce qu'elle est tournée vers l'objet très petit, *ab*, que l'on veut grossir. Cet objet est placé au-delà et très près du foyer principal de l'objectif, qui en donne alors une image réelle, renversée et grossie *a'b'*. On construit cette image en menant les axes optiques *aa'*, *bb'* par le centre optique de l'objectif. La seconde lentille, nommée l'*oculaire*, joue le rôle d'une loupe servant à regarder l'image aérienne *a'b'*, image qui doit être un peu plus rapprochée de l'oculaire que son foyer principal. AB étant l'image

virtuelle ainsi obtenue, il est facile de construire le faisceau lumineux qui, partant du point de l'objet, entre dans l'œil. Par exemple, considérons le point *a* ; nous construirons le cône A*p'*, qui a son sommet au point A et entre dans la pupille *pp'* ; nous joindrons au point *a'* l'intersection *v'* de ce cône avec l'oculaire ; prolongeant le pinceau *v'a'* jusqu'à sa rencontre avec l'objectif *oo'*, puis joignant l'intersection *oo'*, au point *a*, nous obtiendrons le faisceau *aoo'*, *oo'a'*, *a'v'p'*, qui entre en *p'* dans la pupille et fait voir l'image virtuelle A du point *a*. On a construit de même, sur la figure, le faisceau qui correspond au point *b*. — Si le faisceau *a'oo'* ne rencontrait pas l'objectif, cela prouverait que le point *a* est en dehors du champ de l'instrument.

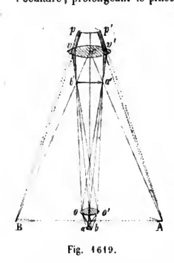


Fig. 1619.

L'objet étant très près du foyer de l'objectif, de très petits déplacements déterminent de grandes variations dans la position de l'image réelle *a'b'* (1987) ; l'ajustement de l'instrument demande donc une certaine attention. On met au point, soit en déplaçant l'oculaire, soit en faisant varier la distance de l'objet. Pour les vues longues, il faut retirer l'oculaire, afin que, son foyer se rapprochant de l'image réelle *a'b'*, l'image virtuelle BA se forme plus loin ; ou bien éloigner l'objet de l'objectif, ce qui rapproche aussi l'image réelle du foyer de l'oculaire. Les myopes devront faire l'inverse.

2186. Champ. — Pour éviter l'aberration de sphéricité produite par les rayons tombant trop obliquement sur l'oculaire, on limite l'image réelle, au moyen d'un diaphragme placé en *a'b'*. Les points lumineux qui font leur image en dehors de l'ouverture de ce diaphragme, ne peuvent donc pas être vus à travers l'oculaire. Or, les points lumineux qui font leur image dans l'intérieur du diaphragme, sont contenus dans un cône dont le sommet est au centre optique de l'objectif, et qui a pour base l'ouverture du diaphragme. La surface de ce cône, prolongée au-delà de l'objectif, limite donc sur le porte-objet l'espace dans lequel sont renfermés les points qui peuvent être vus. Cet espace constitue le *champ* de l'instrument. Comme le cône qui a son sommet au centre optique de l'objectif et qui enveloppe le contour de l'oculaire, diffère peu de celui qui a pour base l'ouverture du diaphragme, on dit ordinairement que le *champ* est l'espace limité par le cône qui a pour base le contour de l'oculaire. Du reste, il est facile de voir que, sans le diaphragme, le champ ainsi défini ne serait pas sensiblement plus grand, car les rayons qui partent des différents points de l'image réelle *a'b'* ne divergent pas dans tous les sens, comme s'il s'agissait de points lumineux, mais ils forment des pinceaux coniques très étroits, dans la

direction de leurs axes secondaires par rapport à l'objectif. On voit donc qu'il faudra que le diamétre de l'oculaire soit assez grand, pour avoir un champ suffisant ; aussi cette lentille est-elle toujours plus grande que l'objectif.

Pour augmenter le champ, on compose l'oculaire, de deux lentilles disposées comme dans la *fig.* 1620. La premiére, *c*, se nomme *lentille de champ*, ou *oculaire de Campani* ; elle a pour effet de rapprocher les faisceaux qui émergent de l'objectif, ce qui rend l'image plus petite, il est vrai, mais en même temps plus nette et plus brillante. Nous verrons aussi que la lentille de champ joue un rôle dans l'achromatisme du microscope (2188).

2187. Calcul du grossissement. — Le grossissement se calcule en multipliant celui de l'objectif par celui de l'oculaire. Nous avons vu comment on calcule le grossissement de l'oculaire, qui se comporte ici comme une simple loupe (2180). Pour obtenir le grossissement de l'objectif, on regarde au microscope un micrométre tracé sur verre et donnant les centièmes de millimétre, et l'on compte le nombre *n* de divisions visibles dans l'ouverture du diaphragme. On mesure ensuite le diamétre de cette ouverture au moyen du même micrométre, et l'on a le grossissement de l'objectif en divisant par *n*, le nombre de divisions comprises dans ce diamètre. La présence de l'oculaire ne change rien au résultat, son grossissement affectant de la même manière l'image réelle et le diamètre du diaphragme. Nous verrons plus loin un moyen pratique de mesurer le grossissement (2194).

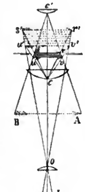


Fig. 1620.

2188. Achromatisme du microscope. — Le microscope, dans l'état de simplicité que nous avons supposé, donne des images irisées sur leur contour, à cause du chromatisme de l'objectif, rendu plus sensible par le grossissement que l'oculaire fait éprouver à l'image réelle. On peut corriger ce défaut en formant l'oculaire de deux lentilles convergentes. Soit *o* l'objectif (*fig.* 1620), et *or'*, *os'* les axes optiques qui passent par les extrémités d'un objet *ab*. Les rayons de différentes couleurs formeront une série d'images renfermées dans l'angle *r'os'* ; l'image rouge *r's'* étant la plus éloignée, et l'image violette *v'u'* la plus rapprochée du point *o*. Si l'on place en *c*, avant le lieu de ces images, une lentille convergente, elle recevra des rayons convergents venant de chaque point de l'objet, et il se formera, au lieu de l'image rouge réelle *r's'*, une autre image réelle *rs*, placée dans l'angle *r'cs'* des axes secondaires *r'c*, *s'c*. L'image violette ira se former en *uv*, plus près de la lentille c, parce que la distance *cv'* est plus petite que la distance *cr'* (1987). Si l'on joint les extrémités *ru*, *su* de ces images, par les droites *vrc'*, *usc'*, les extrémités des autres images se trouveront sensiblement sur ces droites ; et si l'on place en *c'* le centre optique d'une lentille convergente, dont la distance focale soit un peu plus grande que *c'u*, les extrémités *rv*, *su* des images vues à travers cette lentille se super-

poseront, et il n'y aura plus d'auréole irisée. Les deux lentilles c, c' sont fixées à un tube noirci en dedans nommé *porte-oculaire*.

Objectifs achromatiques. — Quand il s'agit de très grands grossissements, la disposition qui précède ne donne pas des images assez nettes. On emploie alors des objectifs achromatiques, composés de lentilles de substances différentes, appliquées les unes sur les autres. Pendant longtemps on a été arrêté par la difficulté de travailler et d'ajuster d'aussi petites lentilles ; MM. Amici, Goring, Ch. Chevalier, Nachet,.... sont parvenus à une réussite complète, et l'on construit aujourd'hui des systèmes achromatiques tellement petits, qu'il faut s'aider d'une loupe pour bien les distinguer. Comme il est difficile de donner à ces lentilles des courbures très prononcées, on a coutume d'en employer plusieurs vissées les unes à la suite des autres, produisant le même effet qu'une seule à plus court foyer. On les fait aussi avec des verres très réfringents, n'exigeant pas, par conséquent, des courbures aussi prononcées ; on en a fait avec des pierres précieuses et même en diamant.

Pour n'avoir pas à se préoccuper de l'achromatisme de l'objectif, on a construit des microscopes dans lesquels l'image réelle est fournie par un miroir concave ; nous y reviendrons plus loin (2114).

Les microscopes les plus défectueux sous le rapport de l'achromatisme, donnent de bons résultats quand on les éclaire avec de la lumière simple, par exemple avec la lampe monochromatique (2058).

2189. Description du microscope composé. — Le microscope composé paraît avoir été inventé par Zacharie Jansen, vers 1590, à l'époque où le télescope prenait naissance. On l'a attribué quelquefois à Drebbel, mais il est constant que ce dernier l'avait emprunté à Jansen. Les premiers microscopes composés étaient très imparfaits ; aussi leur préférait-on le microscope simple. Depuis la découverte de l'achromatisme, ils ont été portés à un degré de perfection admirable, particulièrement dans les trente dernières années, entre les mains de MM. Fraunhofer, Amici, Ch. Chevalier, Oberhausser, Nachet..... On a construit bien des modèles différents de microscopes ; il nous suffira d'en décrire deux, dans lesquels se trouvent réalisées les diverses dispositions qu'on peut rencontrer dans tous les autres.

Microscope de Ch. Chevalier. — Les microscopes sont ordinairement verticaux. Comme, dans cette position, les observations sont pénibles, M. Amici place l'axe de l'oculaire horizontalement, tout en laissant l'axe de l'objectif vertical, de manière que le porte-objet reste horizontal ; les rayons qui ont traversé l'objectif sont réfléchis horizontalement par un petit miroir.

Le microscope de M. Ch. Chevalier (*fig.* 1621) est une imitation de celui d'Amici, avec des modifications qui en rendent l'usage plus facile, et lui permettent de se plier à divers modes d'observation. En o est l'*objectif*, composé de une, deux ou trois lentilles achromatiques, suivant le grossissement que l'on veut obtenir. Ces lentilles sont planes en dessous, et ont chacune de 8 à 10^{mm} de foyer. Les rayons qui ont traversé le système de l'objectif éprouvent la

réflexion totale sur la face hypothénuse d'un prisme rectangulaire *a*, représenté à part en A, qui les renvoie dans la direction horizontale.

L'oculaire E est composé de deux lentilles plan-convexes tournant leur face plane du côté de l'œil. Le *porte-oculaire* s'enfonce à frottement doux dans le tuyau T. A l'endroit où se forme l'image réelle, entre les deux lentilles, se trouve un diaphragme qui limite le champ, et un *réticule* formé de deux fils croisés à angle droit qui sont vus en même temps que l'image réelle de l'objet, et forment des repères fixes dans le champ. Comme ces fils sont grossis, il faut qu'ils soient très fins ; on emploie des cheveux, des fils de soie simple, des fils de toile d'araignée ; mais l'humidité les relâche ou les détruit. On préfère donc des fils de platine excessivement fins, obtenus par la méthode de Wollaston (I,32). L'intérieur de l'instrument est enduit d'une couche noire mate, pour éviter toute réflexion des rayons lumineux qui pourraient en frapper les parois. Le tuyau T est articulé en *c* à une pièce *cc'*, articulée elle-même à la colonne fixe C.

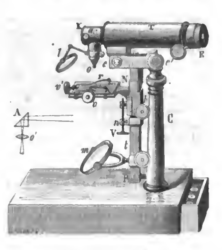


Fig. 1621. — 1/5.

On peut, en combinant divers oculaires avec différents objectifs, faire varier le grossissement, qui peut être porté jusqu'à 4000 fois en diamètre.

Porte-objet. — L'objet que l'on veut observer est placé sur une lame de verre, ou entre deux lames de verre, que l'on pose sur le *porte-objet rvv'*, où elles sont maintenues par deux ressorts *r*. Le porte-objet consiste en une plaque métallique percée en son milieu, et fixée à un curseur N *n* qui peut glisser le long d'une barre carrée *t* fixée à la pièce *cc'*, et arrêtée contre la colonne C au moyen d'un bouton à vis P. La barre *t* est garnie, du côté de la colonne, de dents dans lesquelles s'engagent celles d'un pignon *b* porté par la boîte N*n*, et que l'on fait tourner quand on veut faire varier la distance du porte-objet à l'objectif *o*. Le curseur est composé de deux parties, réunies par une vis de rappel V, par le moyen de laquelle on achève de régler la distance de l'objet à l'objectif, après avoir arrêté la partie *n* au moyen d'une vis de pression, qui ne se voit pas dans la figure.

Le porte-objet est composé de deux plaques superposées ; celle de dessus peut glisser sur celle de dessous, qui est fixée au curseur N*n*, en obéissant à deux vis de rappel : l'une *v'*, lui imprime un mouvement dans le sens de l'axe du tube T ; et l'autre *v* un mouvement transversal. Par ce moyen, on amène

facilement l'objet dans l'axe de l'objectif, et on peut lui faire parcourir le champ sans le perdre de vue. Les vis, *v*, *v'* ont de larges têtes divisées, ce qui permet de les employer comme vis micrométriques pour mesurer le diamètre des objets ; il suffit, pour cela, d'en amener deux points opposés, successivement sous un des fils du réticule de l'oculaire, et de compter le nombre de tours qu'on a fait faire à la vis, dont le pas est connu.

Éclairage de l'objet. — L'objet doit être d'autant plus vivement éclairé que le grossissement est plus fort. Quand il est transparent ou translucide, on l'éclaire en dessous au moyen d'un miroir sphérique concave *m*, qui concentre sur lui la lumière des nuées, du soleil ou d'une lampe. Derrière ce miroir en est appliqué un autre, qui est plan, et sert pour les faibles grossissements. Un écran circulaire fixé sur le porte-objet, et dont le contour porte des ouvertures de différentes grandeurs, sert à restreindre plus ou moins l'espace éclairé. Quand l'objet n'est pas transparent, on l'éclaire en dessus au moyen d'une lentille convergente *l*. Quelquefois l'objectif est entouré d'un petit miroir concave argenté, disposé comme celui du microscope à main (*fig.* 1615), et qui renvoie sur l'objet les rayons qu'il a reçus du miroir *m*. Pour les forts grossissements, on emploie différents appareils d'éclairage, imaginés par MM. Wollaston, Brewster, Dujardin. Ils consistent en un système de lentilles disposées les unes à la suite des autres de manière à concentrer sur l'objet, en dessus ou en dessous, les rayons d'une source lumineuse, à peu près comme cela a lieu dans le microscope solaire (1999).

Le microscope de M. Ch. Chevalier peut être employé verticalement ; il suffit de visser l'objectif dans le prolongement de l'oculaire, après avoir enlevé la pièce K, et de relever le tube T en le faisant tourner autour de l'articulation *c*. — On peut encore employer l'instrument horizontalement, avec le porte-objet vertical ; pour cela, on enlève le bouton P, et l'on place horizontalement la barre *t*, en faisant tourner la pièce *cc'* autour du genou *c'*.

Quand on veut observer les précipités, ou ce qui se passe dans les réactions chimiques ; les vapeurs, les exhalaisons acides ternissent ou attaquent le verre de l'objectif. Dans ce cas, on fait tourner la pièce K, de 90° sur elle-même, de manière que l'objectif soit en haut ; on adapte au tube qui porte cet objectif un collier auquel est fixée une petite barre semblable à la barre *t*, et soutenant le porte-objet, et au-dessus, le miroir éclairant. Une large plaque posée sur le porte-objet, et que l'on peut chauffer sur son contour au moyen de lampes à alcool qu'on y suspend, permet d'opérer à des températures élevées.

2190. Comme second exemple, nous citerons un instrument de M. Nachet, habile artiste qui a fait sa spécialité de la construction des microscopes. L'oculaire achromatique est vissé à l'extrémité d'un tuyau noirci en dedans (*fig.* 1622), dont l'autre extrémité reçoit le porte-oculaire. Le tuyau ou *corps* du microscope est fixé à une petite colonne, qui soutient aussi le porte-objet et le miroir destiné à l'éclairer. Cette colonne est articulée au pied de l'instrument, de manière à pouvoir s'incliner plus ou moins, pour la com-

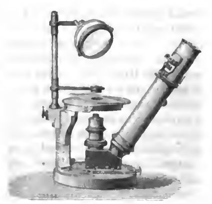
modité des observations. Le porte-objet est fixe; pour mettre au point, on commence par enfoncer plus ou moins le porte-oculaire dans le tuyau, puis on achève en agissant sur la vis qui se voit à l'extrémité de la colonne articulée, et qui fait mouvoir le corps de l'instrument, de manière à le rapprocher ou à l'éloigner du porte-objet.

Dans le grand modèle du microscope de M. Nachet, on trouve en outre les deux vis micrométriques au moyen desquelles on fait parcourir le champ à l'objet, le diaphragme tournant, pour modifier l'éclairage, etc.


Fig. 1622. — 1/5.

Pour les observations de chimie, M. Nachet a construit un microscope dont l'objectif est placé en dessous de l'objet (*fig.* 1623). Un prisme placé à la partie inférieure, renvoie par deux réflexions totales, les rayons qui ont traversé l'objectif dans la direction de l'axe du porte-oculaire. Tout le système est monté sur une plaque rectangulaire qui peut glisser à coulisse sur le pied de l'instrument, de manière qu'on peut changer l'objectif sans déranger le porte-objet.

2191. De l'emploi du microscope composé. — Le microscope composé est souvent utilisé dans les recherches d'histoire naturelle. Quand on emploie des grossissements de 4,000 diamètres, les images sont un peu confuses; ce qui tient, en partie, à ce que les divers points de l'objet ne sont pas, à cause de son épaisseur, à égale distance de l'objectif. En ne dépassant pas un grossissement de 500 fois, on obtient une grande netteté. On augmente aussi la netteté en mettant une goutte d'eau sur l'objet.


Fig. 1623. — 1/5.

Pour connaître la force d'amplification et le degré de netteté dont est susceptible un microscope, on observe certaines préparations, décrites et dessinées par des observateurs munis de très bons instruments, et l'on compare les détails qu'on peut distinguer avec ceux

des dessins. Ces préparations sont généralement désignées sous le nom de *test-objets* ; ce sont de petites écailles prises sur divers insectes, la forbicine, divers papillons. Par exemple, un microscope qui permet de compter les stries qui se remarquent sur les raies longitudinales des écailles du papillon du chou, ou les lignes diagonales des écailles de *podura*, peut être considéré comme très bon.

Il y a, dans les observations microscopiques, surtout quand on emploie les forts grossissements, de nombreuses précautions à prendre pour éviter les illusions, d'autant plus à craindre qu'on a affaire, le plus souvent, à des objets inconnus. Il faut veiller minutieusement à la propreté des verres, éclairer le même objet successivement par les divers moyens, et sous des obliquités différentes. Il est bon aussi de commencer par de faibles grossissements, qui donnent une première idée de ce qu'on devra voir avec des grossissements plus forts [1].

Prisme redresseur. — Le microscope renversant les images, quand on veut disséquer sur le porte-objet, la pointe du scalpel paraît se mouvoir en sens contraire de ce qui a lieu réellement. Pour éviter cet inconvénient majeur, M. Nachet applique sur l'oculaire un prisme triangulaire à bases obliques *acb* (*fig.* 1624), dont la disposition repose sur une observation de M. Amici, et dans lequel les faisceaux émergents se réfléchissent successivement sur les faces latérales *ab*, *ac*, de manière à se croiser dans l'intérieur du prisme, comme on le voit pour les rayons *srre* et *s'r'r'e'*, qui se réfléchissent en *r*, *r* ; *r'*, *r'*. On voit en A l'ensemble du *prisme redresseur*, avec sa monture qui permet de l'appliquer à tous les microscopes.



Fig. 1624.

Goniomètre. — M. Brunner a disposé le porte-objet du microscope, de manière à pouvoir mesurer les angles des cristaux microscopiques dont l'arête est parallèle à l'axe de l'objectif. Le porte-objet est circulaire et peut tourner sur lui-même, au moyen d'une vis de rappel ; il porte une division en degrés munie d'un vernier donnant les minutes. Après avoir fait coïncider l'une des faces du cristal avec l'un des fils du réticule de l'oculaire, on fait tourner le porte-objet, jusqu'à ce que la seconde face coïncide à son tour avec le même fil. — M. Nachet applique à ses microscopes un autre goniomètre, dû à M. Laurence Smith : le porte-objet reste fixe, et c'est l'oculaire qui tourne sur lui-même de quantités angulaires qui se mesurent sur un disque gradué qu'il entraîne dans son mouvement.

Microscope à plusieurs corps. — Le microscope est fréquemment employé

[1] On peut consulter les ouvrages suivants : *Des microscopes et de leur usage*, par M. Ch. Chevalier ; *Traité pratique du microscope*, par M. Mandl ; *Manuel de l'observateur au microscope*, par Dujardin.

dans l'enseignement ; mais on ne peut suivre les opérations du professeur, ou les indications qu'il donne, qu'en regardant après lui ; et quand il s'agit d'objets qui changent d'aspect, il devient difficile de s'entendre. On évite cet inconvénient, au moyen du microscope à *plusieurs corps* de M. Nachet. Dans le microscope à *deux* corps, il y a au-dessus de l'objectif un prisme isocèle à arêtes horizontales P (*fig.* 1625), dans lequel les pinceaux lumineux, partis d'un même point *a* de l'objet, se réfléchissent totalement en *r*, *r*, émergent suivant *f*, *f'*, dans deux directions différentes, et sont reçus par deux oculaires différents, par lesquels deux observateurs peuvent observer simultanément le même objet. Au lieu de deux corps, on peut en disposer 3, 4, en employant, au lieu du prisme, une pyramide dont la base est tournée du côté de l'objectif, et dont

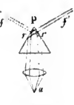
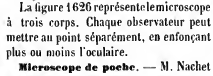
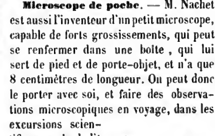
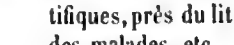


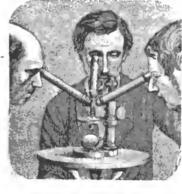
Fig. 1625.

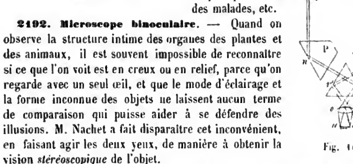

le nombre des faces est en rapport avec celui des oculaires.


La figure 1626 représente le microscope à trois corps. Chaque observateur peut mettre au point séparément, en enfonçant plus ou moins l'oculaire.

Microscope de poche. — M. Nachet est aussi l'inventeur d'un petit microscope, capable de forts grossissements, qui peut se renfermer dans une boîte, qui lui sert de pied et de porte-objet, et n'a que 8 centimètres de longueur. On peut donc le porter avec soi, et faire des observations microscopiques en voyage, dans les


excursions scientifiques, près du lit des malades, etc.


Fig. 1626.


2192. Microscope binoculaire. — Quand on observe la structure intime des organes des plantes et des animaux, il est souvent impossible de reconnaître si ce que l'on voit est en creux ou en relief, parce qu'on regarde avec un seul œil, et que le mode d'éclairage et la forme inconnue des objets ne laissent aucun terme de comparaison qui puisse aider à se défendre des illusions. M. Nachet a fait disparaître cet inconvénient, en faisant agir les deux yeux, de manière à obtenir la vision *stéréoscopique* de l'objet.

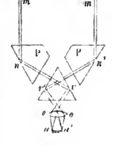


Fig. 1627.

La figure 1627 montre comment les pinceaux des rayons émanant des côtés *a*, *a'* de l'objet, et ayant traversé l'objectif oo, se réfléchissent d'abord

dans un prisme triangulaire rr', puis dans les prismes P, P', pour donner les faisceaux émergents m, m', qui entrent dans les deux yeux aprés avoir traversé deux oculaires correspondants. On voit que le pinceau *arnm* émanant du côté a de l'objet, entre dans l'œil qui est du même côté. Le principe n'est autre que celui qui a été appliqué plus tard au télestéréoscope ; seulement ici les pinceaux lumineux, au lieu d'être rapprochés par les deux réflexions, sont écartés à la distance des deux yeux. La *figure* 1628 représente l'ensemble de l'instrument. Une vis, qui se voit à droite, prés de la partie inférieure des deux corps, sert à les écarter plus ou moins, suivant la distance des deux yeux. Avec un grossissement modéré, cet appareil permet de distinguer le relief des petits objets, avec une netteté qui excite toujours l'étonnement quand on l'observe pour la première fois.

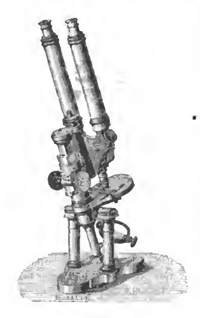


Fig. 1628. — 1/6.

2193. Application de la chambre claire au microscope. — On peut ajuster au porte-oculaire du microscope, différents sytémes de *chambres claires*, au moyen desquelles on peut dessiner les images grossies par l'instrument. Quand le microscope est horizontal, on emploie souvent la chambre claire de M. Sœmmering, consistant simplement en un miroir circulaire d'acier poli m (*fig.* 1629), plus petit que l'ouverture de la pupille, et incliné de 45° sur l'axe de l'oculaire, auquel on le fixe au moyen de l'anneau ab. L'œil étant en o, l'image donnée par l'instrument est vue par réflexion dans ce miroir, pendant que les rayons venant de la pointe du crayon placée dans la direction mc, passent autour de ce miroir. Pour avoir plus de clarté dans l'image, on a remplacé le petit miroir par un miroir plus grand m', percé d'un trou plus petit que la pupille, à travers lequel on regarde dans le microscope, pendant que la pointe du crayon se voit par réflexion.

M. Nachet remplace le miroir m' par un prisme triangulaire p dont l'arête est placée à la hauteur de l'axe de l'oculaire, de manière qu'on regarde dans l'instrument, par dessus cette arête, et qu'on voit le crayon par réflexion totale.

On emploie encore une simple glace inclinée à 45°, à travers laquelle on regarde dans le microscope, pendant que le crayon est vu par réflexion. — Avec ces trois dernières dispositions, l'image du papier horizontal est renversée ; ce qui fait qu'il est difficile de dessiner, la pointe du crayon paraissant

marcher en sens contraire de son mouvement réel. M. Amici fait disparaître cet inconvénient au moyen de deux réflexions. Les rayons qui partent du papier se réfléchissent dans l'intérieur d'un prisme P (*fig.* 1630), avant de se réfléchir sur le miroir percé *n*.

M. Nachet a imaginé une chambre claire pour les microscopes verticaux. Un prisme *abd* (*fig.* 1631), dont la section est un parallélogramme, et dont l'angle en *a* est égal à 45°, est placé de manière que la face horizontale *ac* soit en dehors du corps de l'instrument, et la face oblique *dc*, au-dessus de l'oculaire. Un petit cylindre en verre, *o*, collé à la face *dc* au moyen de mastic en larmes, laisse passer les rayons émergeant de l'oculaire, sans les dévier, pendant que

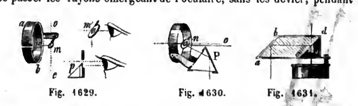


Fig. 1629. Fig. 1630. Fig. 1631.

les rayons venant de la pointe du crayon arrivent dans l'œil suivant une direction parallèle à celle des premiers, après avoir subi deux réflexions totales sur les faces *ab* et *cd*.

2194. Mesure du grossissement. — Le calcul du grossissement du microscope (2187) laisse toujours de l'incertitude, parce que l'image réelle ne se forme pas exactement au foyer de l'oculaire, et que la formule des lentilles, dont on se sert pour calculer le grossissement de celui-ci, suppose son épaisseur négligeable et son ouverture très petite, ce qui n'a pas lieu. On peut mesurer directement le grossissement, au moyen de la chambre claire. Pour cela, on place sur le porte-objet un micromètre tracé sur verre et donnant les centièmes de millimètre. L'image grossie de ces divisions se projette sur une règle divisée en millimètres, placée à la distance de la vision distincte, sur la feuille de papier de la chambre claire, et l'on voit combien de millimètres sont couverts par une division grossie du micromètre. S'il y en a *n*, le grossissement G sera évidemment $G = 100 \times n$.

On peut aussi obtenir, au moyen de la chambre claire, les dimensions absolues de l'objet, en voyant combien son image couvre de millimètres, et divisant ce nombre par le grossissement; car l'égalité $G = 100 \times n$ donne $\frac{1}{100} = \frac{n}{G}$; or, $\frac{1}{100}$ est la longueur d'une division du micromètre.

M. Bertin procède sans chambre claire ; il tient ouvert l'œil gauche pendant que l'œil droit regarde dans le microscope, et projette l'image sur les pointes d'un compas placé à la hauteur du porte-objet, et dont il mesure ensuite l'écart, au moyen d'une règle divisée. Cette distance, divisée par le grossissement, donne la grandeur de l'objet. Ce même procédé peut servir à mesurer le grossissement, en remplaçant l'objet par un micromètre.

Dans toutes ces expériences, il faut que le micromètre, vu directement, se trouve à la même distance que l'image virtuelle, et c'est là là difficulté, la distance de la vision distincte étant comprise entre des limites assez étendues. Quand il s'agit du grossissement, on peut placer la règle à la distance minimum de la vision nette; mais quand on veut mesurer la grandeur d'un objet, il faut nécessairement la placer à la distance de l'image virtuelle.

2195. Application du microscope à la mesure des indices de réfraction des liquides et des corps mous. — La méthode suivante imaginée par M. Brewster permet d'opérer avec de très petites quantités de substance. On prend un microscope muni d'une vis micrométrique qui permet de le déplacer parallèlement à son axe, et dont l'objectif soit un peu saillant.



Fig. 1632.

Une lame de verre à faces bien parallèles, est appliquée sur cet objectif. On mesure, au moyen de la vis, la distance d de l'objectif à un micromètre placé sur le porte-objet, quand les divisions sont vues nettement. On introduit une goutte de liquide entre la lame de verre et l'objectif; cette goutte forme une lentille plan-concave, et il faut, pour voir nettement le micromètre, en éloigner l'objectif. Soit d' la nouvelle distance. En appelant D la distance constante à l'objectif, de l'image réelle faite en avant de l'oculaire, qui reste immobile, et a, a' les distances focales principales de l'objectif et du système formé par cet objectif et par le ménisque liquide, on aura

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{D}=\frac{1}{a},\quad \frac{1}{d'}+\frac{1}{D}=\frac{1}{a'};\quad \text{d'où } \frac{1}{d}-\frac{1}{d'}=\frac{1}{a}-\frac{1}{a'}. \qquad [1]$$

Cela posé, soit f (*fig.* 1632) le foyer principal de l'objectif seul, pour des rayons parallèles venant de r, et f' celui de cet objectif réuni au liquide. Il est facile de voir que des rayons lumineux partant de f' et traversant le liquide seul, formeraient leur foyer virtuel au point f; en effet, si nous supposons une distance insensible entre les deux substances, le rayon $racf'$ aura la même direction que s'il avait passé directement du verre dans le liquide (1966), et le rayon partant de r parcourant la ligne $racf'$, on voit que, s'il partait de f', il sortirait du liquide dans la direction ca, qui, prolongée, passe par le point f. Les points f et f' sont donc des foyers conjugués; on aura donc, en appelant φ la distance focale principale du ménisque liquide seul :

$$\frac{1}{a}-\frac{1}{a'}=\frac{1}{\varphi},\qquad \text{et, par conséquent,}\qquad \frac{1}{d}-\frac{1}{d'}=\frac{1}{\varphi},$$

à cause de l'équation [1]. Or, la valeur de φ en fonction du rayon de courbure R de la face courbe, et de l'indice n du liquide, est (1985)

$$\varphi=\frac{R}{n-1};\qquad \text{on a donc}\qquad \frac{1}{d}-\frac{1}{d'}=\frac{n-1}{R}. \qquad [2]$$

d'où l'on tirera l'indice n. La valeur de n dépend du rayon R de la face extérieure de l'objectif; rayon qui ne peut se mesurer avec précision à cause de sa petitesse. On évite alors d'employer cette quantité, en comparant simplement l'indice du liquide à l'indice bien connu d'un autre liquide, de l'eau par exemple. En opérant sur ce second liquide, on aurait, en représentant l'indice par n', $\frac{1}{d} - \frac{1}{d''} = \frac{n'-1}{R}$; et en éliminant R entre cette équation et l'équation [2], on trouve $\frac{n-1}{n'-1} = \frac{d'-d}{d''-d}\frac{d''}{d'}$; d'où l'on tire n en fonction de n' et des distances d, d', d''.

Au lieu des distances d, d' d'', on peut se servir des grossissements g, g', g'' correspondants; en effet, l'oculaire restant fixe, ces grossissements sont entre eux comme ceux des systémes d'objectifs. Or, ces derniers sont $g = D : d$, $g' = D : d'$, $g'' = D : d''$ (1992). Remplaçant d, d', d'' par les valeurs tirées de ces égalités, l'équation précédente devient $\frac{n-1}{n'-1} = \frac{g-g''}{g-g'}$.

La méthode de M. Brewster n'est pas très précise, à cause de la petitesse des quantités d, d', d'', de la flexibilité de l'œil qui permet de voir nettement à des distances un peu différentes, et parce que les formules employées ne sont qu'approchées. Cependant cette méthode est précieuse, en ce qu'elle n'exige que de trés petites quantités de substance.

Fig. 1633.

Méthode du duc de Chaulnes. — Cette méthode publiée en 1767, s'applique aux solides terminés par des faces parallèles. La plaque étant posée sur le porte-objet, on ajuste l'instrument de maniére à voir nettement les poussiéres qui peuvent se trouver sur la face supérieure; puis on mesure, avec la vis micrométrique, la quantité dont il faut le rapprocher de la plaque pour voir nettement les points de la face inférieure. Comme les rayons qui partent d'un point A de cette face (*fig.* 1633) sont déviés en émergeant, de manière à se rencontrer en a, le microscope devra être déplacé de la quantité Ba, et non de la quantité BA. Or, en appelant i et r les angles d'incidence et de réfraction du rayon Aa, on aura $AB : aB = \tang i : \tang r$; et prenant les *sinus* pour les *tangentes*, parce que les angles i et r sont très petits, on aura $AB : aB = \sin i : \sin r = n$; AB est l'épaisseur de la plaque, et aB le déplacement du microscope.

Ce procédé peut s'appliquer aux liquides, en les renfermant dans une auge formée d'une plaque de verre dans laquelle est percé un trou fermé par deux lames de verre minces. On peut se dispenser de mesurer l'épaisseur de la plaque, en comparant l'indice du liquide à celui de l'eau, ce qui permet d'éliminer AB. Cette méthode est sujette aux mêmes incertitudes que la précédente. M. Bertin l'a modifiée en cherchant, au lieu du déplacement que doit

subir le microscope, pour passer de la vision nette de la surface supérieure, à la vision nette de la surface inférieure, la quantité dont il faut rapprocher l'oculaire, de l'objectif qui reste fixe[1].

II. Lunettes et télescopes.

2196. Les *télescopes* sont des instruments à travers lesquels les objets éloignés sont vus sous un diamètre apparent plus grand qu'à l'œil nu. On distingue le *télescope réfracteur* ou *de réfraction*, dans lequel on n'emploie que des lentilles, et que l'on nomme plus particulièrement *lunette*, et le *télescope catadioptrique*, nommé aussi simplement *télescope*, et dans lequel il y a

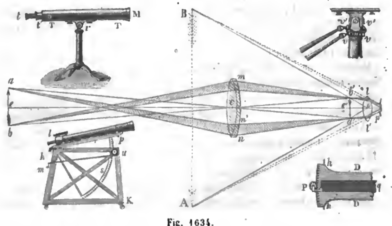


Fig. 1634.

réflexion sur un miroir sphérique. Nous allons d'abord nous occuper des télescopes de réfraction.

2197. Lunette astronomique. — Cette lunette est composée essentiellement de deux lentilles convergentes : l'*objectif*, tourné vers les objets que l'on veut voir, et l'*oculaire*, auquel on applique l'œil. L'objectif *mn* donne d'abord une image réelle renversée, *a'b'* de l'objet *ab* (*fig.* 1634), image beaucoup plus petite que l'objet, à cause de la grande distance de ce dernier. On regarde ensuite cette image aérienne *a'b'* à la loupe, au moyen de l'oculaire *ll'*, placé à une distance de *a'b'* un peu moindre que sa distance focale principale. On voit alors une image AB de l'objet, virtuelle et renversée.

On met au point en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif. Comme pour le microscope composé (2185), il faut enfoncer l'oculaire pour

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 288.

les myopes, et le retirer pour les presbytes. Il faut aussi l'enfoncer d'autant plus que l'objet observé est plus éloigné ; l'image focale se rapprochant de l'objectif quand l'objet s'en éloigne (1987).

Pour construire le pinceau lumineux qui entre dans la pupille p et fait voir l'image A d'un point a, on joint le point A au contour de la pupille ; puis, au point a', l'intersection du cône Ap et de l'oculaire ; on prolonge en $a'nn'$ le cône ainsi obtenu, et l'on joint enfin l'intersection nn' de ce cône et de l'objectif, au point lumineux a. On obtient ainsi le faisceau onn', $nn'a'$, $a'p$, qui fait voir l'image A du point a. On a construit aussi, sur la figure, le faisceau qui correspond au point b, et fait voir son image B.

On voit que le rôle de l'objectif consiste à fournir une image aérienne de l'objet, image que l'on regarde ensuite à la loupe. Comme cette image doit être fortement grossie, il faut qu'elle soit très brillante. On remplit cette condition en donnant à l'objectif une grande ouverture, afin qu'il concentre en chaque point de l'image réelle un grand nombre de rayons partant de l'objet. Pour n'avoir pas d'aberration de sphéricité, il faut en même temps que le foyer de l'objectif soit très long. Cela nous explique pourquoi les fortes lunettes sont très longues, et ont un objectif de grand diamètre.

Si l'on éloigne l'oculaire, de manière que l'image aérienne en soit plus éloignée que son foyer principal, il se forme en dehors de cet oculaire une seconde image réelle. C'est cette image que l'on reçoit dans la chambre noire pour la fixer par les procédés de la photographie (2079).

Champ. — Comme pour le microscope composé (2186), le champ est limité par la surface d'un cône ayant son sommet au centre optique c de l'objectif, et ayant pour base le contour de l'oculaire, ou plus exactement l'ouverture d'un diaphragme placé en $a'b'$. Comme l'oculaire est d'autant plus petit qu'il grossit davantage, on voit que le champ sera d'autant moins étendu que la lunette sera plus forte. Remarquons aussi que les faisceaux sortent de l'oculaire en convergeant les uns vers les autres ; il y a donc une distance à laquelle l'œil profitera de tout le champ, tandis que, en deçà ou au-delà, il ne pourrait voir tout le champ à la fois. Le croisement des faisceaux en p forme le *cercle de Ramsden* ou *point oculaire* ; on y place un diaphragme dont le trou se nomme *œilleton*, et contre lequel on applique l'œil. Ce diaphragme est inutile dans le le cas des forts grossissements, car le cercle de Ramsden est alors tellement rapproché de l'oculaire, qu'il faut placer l'œil le plus près possible.

2198. Disposition de la lunette astronomique. — L'objectif est enchâssé dans un anneau métallique, qu'on nomme sa *sertissure*, vissé à l'extrémité d'un tuyau ordinairement en laiton, noirci en dedans. L'oculaire est *serti* à l'extrémité d'un tube plus étroit, pouvant s'enfoncer plus ou moins dans le tuyau, pour mettre au point suivant la distance. On voit en tM (*fig.* 1634) une lunette montée sur un pied, auquel elle est articulée en r, de manière à pouvoir tourner autour d'un axe vertical et autour d'un axe horizontal. TT est le *corps* de la lunette, t le tube porte-oculaire, qui s'enfonce

dans un second tube t'. Après avoir mis au point approximativement, on achève, en faisant mouvoir le tube t', au moyen d'un pignon denté agissant sur une crémaillère fixée à ce tube.

Il faut une certaine habitude pour *pointer* la lunette, c'est-à-dire pour la diriger de manière que l'astre que l'on veut observer soit dans le champ. Pour faciliter l'opération, les deux mouvements sont souvent imprimés au corps T au moyen de vis sans fin ; l'une agissant sur l'arbre vertical, l'autre sur l'axe horizontal. Ces vis sont représentées à part en *vv* et *v'v'* (*fig.* 1634). On les fait tourner au moyen de baguettes articulées par des charnières universelles. Dans le cas de forts grossissements, la lunette, longue et pesante, ne peut être appuyée en un seul point, et de plus il faut que ses mouvements se fassent très lentement. Il existe différents systèmes de supports pour ces sortes de lunettes. Le croquis *l*K (*fig.* 1634) donne une idée d'une des dispositions adoptées. La lunette est posée sur une tablette en bois *hp*, appuyée sur une seconde tablette plus large, sur laquelle elle peut glisser en tournant autour d'un boulon *p*. La tablette inférieure peut tourner autour d'une charnière horizontale *h*, portée par le pied en charpente *mu*K de l'instrument. Pour faire mouvoir la lunette dans un plan vertical, on fait tourner, au moyen de la manivelle *m*, une vis sans fin *u*, dont la roue entraîne un pignon qui engrène dans un arc denté *s*, fixé sur la tablette inférieure. — Le mouvement dans le plan horizontal, est produit au moyen d'un pignon fixé à la tablette supérieure et engagé dans des dents fixes de la tablette inférieure ayant leur centre au boulon *p* ; comme on le voit en P*q*, où DD est la tablette inférieure, mobile autour de l'axe horizontal *hh*, *q* la tablette supérieure, et P le pignon denté, qui s'y trouve fixé par un levier articulé, de manière qu'on peut l'écarter du secteur denté pour diriger d'abord, à peu près, la lunette par de grands mouvements. Comme le boulon *p* est très éloigné du pignon P, de grands déplacements de ce dernier correspondent à de très petits déplacements de l'axe de la lunette.

Chercheur. — Sur le côté du corps de la lunette, on dispose une petite lunette peu grossissante *l* (*fig.* 1634), nommée *chercheur*, dont l'axe est exactement parallèle à celui de la lunette principale, et qui porte un réticule. On fait coïncider le point que l'on veut observer, avec le croisement des fils, ce qui est facile, vu le faible grossissement du chercheur, et alors ce point se trouve dans le champ de la lunette principale.

Dans les observatoires, on dispose des lunettes qui sont mues par une horloge, de manière à décrire un cône autour d'une parallèle à l'axe du monde, et à suivre l'astre dans son mouvement diurne. La lunette est alors dite *parallactique*.

2199. Achromatisme des lunettes. — L'objectif est achromatique et composé de deux lentilles, l'une biconvexe en crown-glass, l'autre concave-convexe en flint. Quelquefois il y a trois lentilles. Pendant longtemps on a été arrêté par la difficulté d'obtenir de grands disques de verre purs et exempts

de stries. Un simple fondeur en verre, Guinand, est parvenu à obtenir des disques de 38 centimètres, et même bien au-delà. On avait essayé antérieurement de donner de petites dimensions à la lentille de flint, en l'éloignant de la lentille de crown ; c'est ainsi que Barlow et Fresnel employaient leurs lentilles liquides (2101). La lunette se nomme *dialytique* quand les deux parties de l'objectif sont ainsi séparées.

M. Cauchoix a fait des objectifs dont le crown était remplacé par du cristal de roche, ce qui permet de réduire la longueur de la lunette, d'un tiers environ avec les mêmes courbures, et, par conséquent, sans augmenter l'aberration de sphéricité. L'instrument se nomme alors *lunette vitro-cristalline*.

Disposition de l'oculaire. — Quand on veut obtenir un très fort grossissement, on sacrifie quelque chose de la netteté, et l'on emploie un oculaire simple. On pourrait construire des oculaires achromatiques en superposant deux lentilles, mais le grossissement serait trop faible. Campani a imaginé de composer l'oculaire, de deux lentilles plan-convexes de même substance. Dans l'oculaire *positif*, ou de *Ramsden*, les deux lentilles sont situées au-delà de l'image focale faite par l'objectif ; dans ce cas, leurs surfaces convexes sont tournées l'une vers l'autre. Dans l'oculaire *négatif*, ou de *Huyghens*, l'image réelle se forme entre les deux lentilles, dont les faces planes sont alors tournées vers l'œil. C'est un oculaire semblable qu'on emploie pour achromatiser les microscopes (2188). La lentille qui se trouve du côté de l'objectif se nomme *verre de champ* ou lentille collective parce qu'elle augmente le champ de l'instrument, mais au détriment de l'étendue de l'image focale. Dans ce cas, le réticule, qui est aussi une invention d'Huyghens, doit être placé entre les deux lentilles. Le système de Ramsden présente cet avantage, que le micromètre, placé en dehors du tube porte-oculaire, peut recevoir divers mécanismes au moyen desquels on fait mouvoir les fils, pour certaines observations astronomiques.

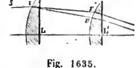


Fig. 1635.

L'achromatisme du double oculaire s'obtient par un artifice particulier, en compensant l'une par l'autre l'aberration de réfrangibilité et l'aberration de sphéricité, qui ne sont sensibles que pour les rayons qui traversent les lentilles à une certaine distance de l'axe. Soit L (*fig.* 1635) la première lentille, et *si* un rayon venant de l'objectif ; ce rayon forme le faisceau dispersé *riv*, qui rencontre la seconde lentille L', beaucoup plus petite que la première. Le rayon violet *iv* la rencontrant plus près de l'axe que le rayon rouge, est moins dévié que lui ; et, si les courbures sont convenables, ces rayons formeront un pinceau cylindrique, et, par conséquent, incolore. — Du reste, ce n'est que par des tâtonnements et des soins multipliés, qu'on arrive à obtenir des oculaires, comme des objectifs, dépourvus d'aberration de réfrangibilité aussi bien que de sphéricité.

2200. Calcul et mesure du grossissement. — Le grossissement n'est

autre chose que le rapport des diamètres apparents BoA : *acb* (*fig.* 1634), que présente l'objet vu dans la lunette et vu à l'œil nu, ou le rapport Boc : *ace* de la moitié de ces angles. Huyghens, qui le premier a calculé le grossissement, considère les tangentes des angles, au lieu des angles eux-mêmes, et suppose que l'image *a'b'* se trouve au foyer principal de l'objectif et au foyer principal de l'oculaire ; ce qui est sensiblement vrai, l'objet *ab* étant à une très grande distance de l'instrument. F et *f* désignant les distances focales des deux lentilles, les triangles rectangles *b'e'o*, *b'e'c* donnent

$$\text{tang}\, b'oe' = \frac{b'e'}{oe'} = \frac{b'e'}{f}; \quad \text{tang}\, b'ce' = \frac{b'e'}{ce'} = \frac{b'e'}{F}; \quad \text{d'où} \quad \frac{\text{tang}\, b'oe'}{\text{tang}\, b'ce'} = \frac{F}{f}.$$

Le grossissement est donc égal au rapport des distances focales de l'objectif et de l'oculaire. On voit qu'il faut, pour que la lunette grossisse beaucoup, que l'objectif ait un très long foyer, et l'oculaire un très court. Ce résultat pouvait se prévoir ; car l'oculaire grossit d'autant plus l'image réelle *a'b'* que son foyer est plus court (2180), et cette image est d'autant plus grande que le foyer de l'objectif est plus long, le rapport entre les grandeurs de l'image et de l'objet étant égal à *ec* : *ce'*. On voit aussi que les lunettes sont d'autant plus longues qu'elles amplifient davantage ; aussi indique-t-on souvent leur puissance en donnant la longueur du foyer de l'objectif.

Si l'on regarde dans une lunette par le gros bout, le rapport F : *f* devra être renversé ; les objets paraîtront donc plus petits qu'à l'œil nu.

Ramsden a imaginé un procédé qui permet de mesurer le grossissement sans connaître les distances focales des deux lentilles. Après avoir mis au point pour les objets éloignés, on enlève l'objectif, et, tournant le tuyau vers le ciel, on reçoit sur un écran l'image de l'ouverture, donnée par l'oculaire, et l'on mesure la distance *d* de cette image et la distance $F + f$ de l'ouverture à l'oculaire. Le grossissement sera alors égal au rapport $(F + f) : d$. En effet, si l'on remplace *d* par sa valeur tirée de la formule des lentilles, qui est ici $\frac{1}{F+f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}$, ce rapport devient égal à F : *f*, c'est-à-dire au grossissement trouvé plus haut. Cette méthode n'est pas très précise, à cause de l'incertitude qui existe sur la position exacte de l'image focale. On peut, du reste, remplacer le rapport $(F + f) : d$ par celui des diamètres de l'ouverture et de son image formée par l'oculaire.

Mesure directe du grossissement. — On regarde à travers la lunette, une échelle divisée placée à une grande distance, pendant qu'avec l'autre œil on la voit directement. La lunette étant dirigée de manière que les deux échelles se superposent, on compte le nombre *n* de divisions vues à l'œil nu, qui se trouvent comprises dans une seule division vue dans la lunette. Ce nombre représente évidemment le grossissement en diamètre. Cette méthode est due à Galilée. — Quand il s'agit d'une forte lunette, le tuyau cache l'échelle

à l'œil extérieur. M. Pouillet emploie alors une espèce de chambre claire, qui se fixe à l'oculaire *o* au moyen de vis *v*, *v'* (*fig.* 1636), et qui est composée de deux miroirs *m*, *n* inclinés à 45°. Le miroir *n* est percé d'un petit trou par lequel on voit l'échelle à travers la lunette, pendant que les rayons réfléchis sur les deux miroirs la font voir telle qu'elle apparaîtrait à l'œil nu. — Cette méthode s'applique à tous les instruments qui nous restent à décrire. Nous verrons plus tard un autre procédé dans lequel on se sert de la double réfraction.

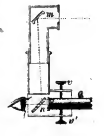


Fig. 1636.

2201. De la clarté. — La clarté de l'image virtuelle dépend de l'éclat de l'image réelle, par conséquent du diamètre de l'objectif, et du grossissement. Considérons d'abord *un point unique*, par exemple une étoile, qui n'a pas de diamètre apparent sensible, et supposons que le pinceau émergent soit assez mince pour passer tout entier par la pupille, ce qui a lieu quand l'oculaire est très petit. Les quantités de lumière reçues dans l'œil, regardant à travers la lunette et regardant directement, seront entre elles comme les carrés des diamètres D et *p* de l'*objectif* et de l'ouverture de la pupille. Le rapport $D^2 : p^2$ représentera donc l'éclat de l'étoile dans la lunette, comparé à l'éclat à l'œil nu. Si, par exemple, le diamètre de l'objectif est 100 fois celui de la pupille, l'éclat sera 10,000 fois plus grand qu'à l'œil nu. Cela nous explique pourquoi on distingue beaucoup plus d'étoiles avec une lunette qu'à l'œil nu.

Considérons maintenant un objet lumineux ayant un diamètre apparent sensible, l'éclat de *chacun* des points de l'image sera $D^2 : p^2$. Mais cette image étant grossie, la lumière émanant de l'objet sera répartie, au fond de l'œil, sur une surface proportionnelle au grossissement G^2 ; la clarté sera donc $c = D^2 : p^2 G^2$. Cette expression peut se mettre sous une autre forme, car on a $G = D : d$; *d* étant le diamètre du petit cercle de Ramsden (2197). Substituant, il vient $c = d^2 : p^2$. La clarté est donc égale au rapport de la surface du cercle de Ramsden à celle de la pupille, quand on suppose que tous les rayons émergents entrent dans l'œil, c'est-à-dire quand *d* est moindre que *p*. On voit que *c* est toujours moindre que l'éclat de l'objet vu à l'œil nu ; il lui est tout au plus égal, quand le cercle de Ramsden est égal à l'ouverture de la pupille. Pour les astres, il suffit d'une clarté égale à $\frac{1}{8}$; pour les objets terrestres, il faut aller jusqu'à $\frac{1}{2}$, à cause de leur faible éclat.

Les étoiles étant vues avec plus d'éclat dans une lunette qu'à l'œil nu, et la lumière atmosphérique étant affaiblie à mesure que *d* diminue, c'est-à-dire que le grossissement est plus grand, on comprend pourquoi les lunettes permettent de distinguer pendant le jour des étoiles d'autant plus faibles que le pouvoir amplifiant est plus grand.

Les qualités d'une lunette sont relatives au grossissement, à la netteté des images et à leur clarté. Indépendamment des conditions géométriques que nous

avons fait connaître, il y a certaines conditions physiques dont on ne peut bien apprécier l'influence que par des essais directs. Tels sont la perfection des courbures des lentilles, leur ajustement, la pureté du verre. On a recours, pour essayer une lunette, à l'observation de certains objets célestes qui servent de termes de comparaison. On observe ordinairement des étoiles doubles plus ou moins difficiles à dédoubler, les bandes de l'anneau de Saturne, ses divers satellites, certaines nébuleuses, certaines très petites étoiles. La faculté de faire distinguer des objets lumineux de très faible éclat dépend surtout de la clarté, et constitue ce que W. Herschel appelait la *force pénétrante* de l'instrument, qu'il ne faut pas confondre avec sa force amplifiante.

2202. Application de la lunette astronomique. — Avant le XVIIe siécle, les astronomes ne pouvaient avoir aucune idée de la constitution physique des corps célestes. L'invention des lunettes est venue donner un essor inattendu à l'astronomie physique, en fournissant des données positives sur cette constitution, en faisant découvrir une infinité d'astres dont on ne soupçonnait pas même l'existence, et permettant ainsi de pénétrer dans la profondeur de l'espace et d'étudier, suivant la belle expression de W. Herschel, la *structure* des cieux. Les découvertes se sont dès lors multipliées, et chaque perfectionnement apporté à l'admirable instrument qui accroît la portée et la puissance de la vision, a été l'occasion de découvertes nouvelles, qui, à leur tour, en ont fait naître d'autres. Un des plus grands réfracteurs est celui qu'ont construit MM. Lerebours et Secretan, pour l'observatoire de Paris. L'objectif a 38 centimétres de diamétre et 8 mètres de foyer. Le grossissement linéaire dépasse de beaucoup le nombre 1000. On vient d'apprendre en Europe qu'il existe à Cambridge, aux Etats-Unis, une lunette qui a 18 $\frac{1}{4}$ pouces de diamétre, ou (46^{cm} environ s'il s'agit de pouces anglais, et 50^{cm} s'il s'agit de l'ancien pouce français) ; c'est la plus puissante lunette qu'on ait encore construite.

L'application des lunettes à réticule, aux instruments de mesure, a aussi fait faire d'immenses progrès à l'astronomie et à la physique, en permettant d'obtenir un degré de précision que ne pouvaient donner les alidades à pinnules; il avait fallu la persévérance et le génie de Kepler pour découvrir, avec des moyens aussi imparfaits, les belles lois qui portent son nom. C'est à Simon Morin que l'on doit l'idée de remplacer l'alidade par une lunette à réticule, vers 1660, idée attribuée par les Anglais à leur compatriote Gascoigne. Cette application importante fut d'abord repoussée, à l'instigation d'Hévélius et malgré les efforts de Hooke ; mais vers 1667, Picard ayant appliqué une lunette au quart de cercle qui lui servit à la mesure du méridien, et Auzout ayant publié des résultats précis d'observations faites aussi à l'aide de lunettes, l'usage s'en répandit rapidement.

2203. Lunette terrestre. — La lunette astronomique renverse les images, ce qui est un grand inconvénient quand on veut observer des objets terrestres. Kepler avait proposé de remettre l'image droite, en recevant les rayons qui partent des points de cette image, sur une lentille convergente

placée à une distance assez grande pour fournir une seconde image qui se trouve redressée, et qu'on grossit avec l'oculaire. Le P. Scheiner exécuta des lunettes d'après ce principe, mais il trouva que les images étaient déformées sur leur contour. C'est alors que le P. Rheita imagina la *lunette terrestre*, *lunette d'approche* ou *longue-vue*, telle qu'on l'exécute aujourd'hui. La *figure* 1637 représente le porte-oculaire de cet instrument. *ac* est l'image réelle renversée fournie par l'objectif. Une lentille *o* est placée à une distance de cette image égale à sa distance focale principale, de manière que les rayons partis d'un point de l'image réelle sortent tous de cette lentille parallèlement à l'axe optique qui leur correspond. Par exemple, les points *a* et *c* donnent les faisceaux cylindriques *rn*, *r'n'* qui se croisent à une certaine distance de la lentille o, d'autant plus petite que son foyer est plus court. Une seconde lentille *o'*, placée au-delà du point de croisement, fait converger les rayons de chaque faisceau cylindrique, sur l'axe secondaire correspondant à ce faisceau ; c'est-à-dire sur la droite menée par le centre optique *o'* parallèlement à ce faisceau. Par exemple, les faisceaux fournis par les points *a* et c donneront des images *a'*,*c'* de ces points situées à une distance *o'* de la lentille égale à sa distance focale principale. L'image *a'c'* sera renversée par rapport à *ac*, et, par conséquent, droite par rapport à l'objet. Si les deux lentilles o, o' avaient le même foyer, les deux images *ac*, *a'c'* seraient égales. L'image *a'c'* est ensuite vue à travers le système oculaire LL', comme dans la lunette astronomique.



Fig. 1637.

Le grossissement est égal à $F : f$, comme pour la lunette astronomique, quand les deux images *ac*, *a'c'* sont égales. Si elles sont inégales, le rapport de leurs diamètres est évidemment celui des distances focales φ, φ' des deux lentilles; on a donc $\frac{ac}{a'c'} = \frac{\varphi}{\varphi'}$, et le grossissement est alors $\frac{F\varphi'}{f\varphi}$.

Le champ n'est pas changé par la présence des verres intermédiaires, quand on les place à une distance l'un de l'autre telle que le second reçoive tous les faisceaux parallèles venant du premier ; il faut pour cela que ces verres soient d'autant plus rapprochés que le second est plus petit. Ordinairement, on donne à la distance qui les sépare une valeur un peu plus grande que la somme de leurs foyers.

Lunette de nuit. — La clarté est diminuée dans la lunette terrestre par les réflexions aux surfaces des verres. On compense en prenant un objectif plus grand. C'est ce que l'on fait surtout pour les *lunettes de nuit*, afin que l'image soit distincte, malgré le très faible éclat des objets.

2204. Lunette polyalde. — Supposons que l'image *ac* (*fig.* 1637) soit plus rapprochée de la lentille *o* que son foyer principal, les faisceaux *rn*, *r'n'* seront un peu divergents, et dans le même cas que s'ils partaient de l'image

virtuelle, *grossie et renversée*, fournie par les rayons émanant des différents points de *ac*. Ces faisceaux divergents seront reçus par la lentille *o'*, qui donnera une image réelle et renversée *a'c'* de l'image virtuelle grossie, comme si cette dernière image était formée par l'objectif d'une seconde lunette, dont l'oculaire serait LL', et avec laquelle on l'observerait. Le système forme donc comme deux lunettes astronomiques placées l'une à la suite de l'autre. Le grossissement sera alors le produit des grossissements des deux lunettes. Or, le grossissement de la seconde dépend de la distance de son objectif *o'* à l'image virtuelle qu'elle sert à observer, et cette distance elle-même dépend de la distance *oc*. On pourra donc faire varier le grossissement en déplaçant le système des verres intermédiaires. C'est ce qu'a fait M. Cauchoix dans les

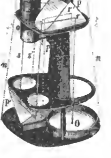
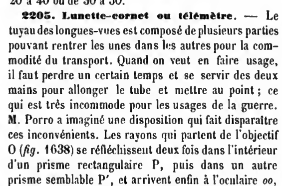


Fig. 1638.



lunettes qu'il nomme *polyaldes* ou *pancratiques*. Le grossissement varie ordinairement dans le rapport de 20 à 40 ou de 30 à 50.

2205. Lunette-cornet ou télémètre. — Le tuyau des longues-vues est composé de plusieurs parties pouvant rentrer les unes dans les autres pour la commodité du transport. Quand on veut en faire usage, il faut perdre un certain temps et se servir des deux mains pour allonger le tube et mettre au point ; ce qui est très incommode pour les usages de la guerre. M. Porro a imaginé une disposition qui fait disparaître ces inconvénients. Les rayons qui partent de l'objectif O (*fig.* 1638) se réfléchissent deux fois dans l'intérieur d'un prisme rectangulaire P, puis dans un autre prisme semblable P', et arrivent enfin à l'oculaire *oo*, après s'être repliés ainsi, comme se replient les rayons sonores dans un cornet acoustique ; d'où le nom de *lunette-cornet*.

Si les deux prismes avaient leurs arêtes parallèles, l'image réelle, rejetée devant l'oculaire, serait renversée ; car si le premier prisme la redresse, comme on le voit en suivant la marche des rayons O*r*, O*r'*, qui passent par le centre optique de l'objectif, rayons qui changent de côté l'un par rapport à l'autre après les deux réflexions sur le prisme P, un changement semblable aurait lieu dans le second prisme, et l'image serait de nouveau renversée. Mais si l'on fait tourner le prisme P' de 90° autour de la normale à sa face hypothénuse, l'image tournera de 90° pour chaque réflexion, et par conséquent de 180° en tout ; elle se trouvera donc redressée, comme on le voit sur la figure ; car les rayons *s*, *s'* sont placés, l'un par rapport à l'autre, d'une manière opposée aux rayons O*r*, O*r'*. On pourra donc observer immédiatement l'image, avec l'oculaire, sans avoir besoin de verres intermédiaires. Le tube oculaire est alors plus court, et la lunette peut être réduite au quart de la longueur d'une longue-vue à tirage de même force. La ligne ponctuée *nnn* représente l'enveloppe extérieure de l'instrument. Pour mettre au point, on agit, par le pouce de la

main avec laquelle on empoigne l'instrument, sur une palette p placée en dehors ; un petit levier l fait alors mouvoir le tube oculaire. De cette manière, on n'a à faire usage que d'une seule main. — Un réticule, composé de plusieurs fils horizontaux, permet d'évaluer approximativement les distances des objets dont les dimensions sont connues, par exemple, un fantassin ou le fusil qu'il tient verticalement. On observe combien l'image de l'objet recouvre de fils parallèles, et la distance correspondante est donnée par une petite table jointe à l'instrument. C'est à cause de cet usage qu'on lui a donné le nom de *télémètre*.

Lunette Napoléon. — En ajoutant un 3e prisme, M. Porro est parvenu à donner à l'instrument une longueur de quelques centimètres seulement dans le sens de son axe. Un *prisme ménisque* (1995) sert d'objectif, et renvoie les rayons verticalement de haut en bas. Ils sont ensuite renvoyés de bas en haut par un prisme rectangulaire, disposé comme le prisme P′ de la *figure* 1638 et logé dans un cylindre vertical par lequel on tient l'instrument. Les rayons sont ensuite renvoyés horizontalement dans l'oculaire, par un troisième prisme placé à côté du premier.

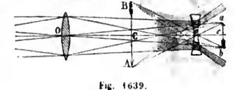


Fig. 1639.

2206. Lunette de Galilée. — La lunette de Galilée montre les objets droits avec deux verres seulement. L'oculaire o (*fig.* 1639) est divergent, et placé plus près de l'objectif O que l'image réelle ab que formerait ce dernier. Les rayons qui convergent vers les points de cette image, sont rendus divergents par l'oculaire, et vont former l'image virtuelle AB, dont les extrémités sont situées sur les axes secondaires passant par les points a et b. On a ombré sur la figure, les faisceaux qui, partant des extrémités de l'objet, font voir les images A et B de ces extrémités.

Le *grossissement* est égal à $\frac{\text{tang}\ \frac{1}{2}\ aoc.}{\text{tang}\ \frac{1}{2}\ aOc.} = \frac{Oc}{oc} = \frac{F}{a}$, en supposant que la distance oc soit égale à la distance focale principale de l'oculaire.

Champ. — On voit que les faisceaux s'écartent les uns des autres, en sortant de l'oculaire ; de sorte que le *champ* est peu étendu. Pour l'avoir le plus grand possible, il faut mettre l'œil tout près de l'oculaire. Le champ se mesure alors par l'angle sous-tendu par le diamètre de la pupille, et ayant son sommet au centre de l'objectif. Il ne dépend donc pas de la grandeur de l'oculaire, pourvu que cet oculaire ne soit pas moindre que la pupille ; et il peut être représenté par le diamètre de la pupille divisé par la distance des deux verres.

Distance des verres. — On peut demander quelle doit être cette distance, x, pour qu'on voie nettement. La formule des lentilles, appliquée à l'oculaire divergent recevant des rayons convergents, est $-\frac{1}{p}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{a}$. p est égal à oc (*fig.* 1639) ou à $F-x$; p' est

la distance D de la vision distincte ; on a donc $\frac{1}{F-x}+\frac{1}{D}=\frac{1}{a}$; d'où $F-x=\frac{a}{1-\frac{a}{D}}$. La distance $F-x=oc$ est donc plus grande que a, et d'autant plus que D est plus petit. Les myopes devront donc rapprocher les deux verres, et les presbytes, les éloigner, comme pour la lunette à verres convergents. Cela se voit aussi au moyen de la valeur $x=F-\frac{a}{1-\frac{a}{D}}$.

Achromatisme. — L'oculaire étant divergent et l'objet convergent, les dispersions de ces deux lentilles se font en sens inverse; si donc on fait l'oculaire en flint, et l'objectif en crown, on pourra obtenir l'achromatisme. Mais alors le grossissement ne serait que 1,25. On tourne la difficulté en achromatisant *partiellement* l'objectif, au moyen d'une lentille en flint superposée, ce qui permet de disposer des courbures de l'oculaire de manière à obtenir de plus forts grossissements. C'est ce que l'on fait dans les *lorgnettes de spectacle*, pour lesquelles on préfère le système de Galilée, parce que la lunette est alors très courte, l'oculaire ne se composant que d'un verre, et sa distance à l'objectif étant moindre que la distance focale de ce dernier.

2207. Lunette à prisme. — Blair, Amici et M. Brewster ont obtenu une image grossie des objets éloignés, sans employer de lentilles. Nous savons qu'on peut, en regardant à travers un prisme achromatique, voir les objets, allongés dans le sens perpendiculaires à ses arêtes, quand on s'écarte dans un certain sens de la position du minimum de déviation (1885). Si donc, on regarde à travers deux prismes achromatiques égaux perpendiculaires l'un à l'autre, l'image des objets sera agrandie dans deux directions perpendiculaires l'une à l'autre, et, par conséquent, grossie dans tous les sens. On peut obtenir ainsi une amplification de 3 ou 4 fois.

2208. De l'invention des lunettes grossissantes. — C'est au moyen de la combinaison d'un verre divergent avec un verre convergent que les lunettes grossissantes ont été découvertes. On a voulu en attribuer l'invention aux anciens, en s'appuyant sur un manuscrit de la fin du XII[e] siécle, dans lequel Ptolémée est représenté regardant les astres à travers un tuyau ; mais Aristote parle de l'habitude des anciens de regarder les objets éloignés à travers de longs tubes, pour intercepter la lumière diffuse. Ce n'est qu'au XVI[e] siécle qu'on trouve les premiers indices de la connaissance des lunettes.

Dans un ouvrage de Frascator, publié en 1538, il est dit qu'on voit les objets plus grands et plus proches « à travers deux verres oculaires placés l'un sur l'autre. » Rien, dans ce passage, n'autorise à supposer que ces verres étaient à une certaine distance l'un de l'autre. On cite un autre passage du même auteur, dans lequel il est dit que la lune paraît très proche vue à travers un verre *très dense*; mais il n'est question que d'un seul verre; et

l'expérience prouve qu'en regardant à travers une lentille à très long foyer, les objets éloignés paraissent grossis, mais en même temps très confus.

D'après P. Borrel, qui a publié, en 1655, un livre sur l'origine du télescope, l'invention de cet admirable instrument aurait été faite en 1590, par un fabricant de bésicles de Middelbourg, nommé Zacharie Jansen ou Hansen. Ce serait le hasard qui l'aurait mis sur la voie : Ses enfants ayant regardé fortuitement à travers deux verres, l'un convergent et l'autre divergent, virent le coq du clocher voisin beaucoup plus gros et beaucoup plus rapproché qu'à l'œil nu, et firent part de cette singularité à leur pére ; la *lunette batave* ou de *Hollande*, comme on l'appela d'abord, était dés-lors inventée. Quelques années après, un de ces instruments fut offert au prince Moritz de Nassau. La nouvelle de cette invention se répandit, et un étranger ayant voulu prendre des informations auprès de Z. Jansen, s'adressa par erreur à un autre lunetier, nommé Jean Lippershey ou Lipperson, qui demeurait à côté, et, par ses questions, lui donna lieu de deviner la construction de l'instrument. Lippershey demanda, en 1606, aux Etats Généraux, un brevet pour cette invention, qu'il divulgua, tandis que le prince Moritz voulait qu'elle restât secrète pour s'en servir dans la guerre avec les provinces unies. C'est ce qui fait que plusieurs auteurs ont regardé Lipperson comme l'inventeur. Enfin, on a voulu attribuer les premières lunettes à J. Metius ou Metzu et à Drebbel ; mais il est constant qu'ils n'ont fait que les répandre, aprés en avoir acheté quelques-unes de Z. Jansen. On a encore nommé Antoine de Dominis et Porta. Or, le premier n'a écrit sur ce sujet qu'en 1611, un an après que Galilée eut construit sa premiére lunette ; quant au second, il dit simplement que la lentille convergente faisant voir les objets plus gros, et la lentille divergente les faisant voir plus petits mais plus clairs, en combinant ces deux lentilles, on verra plus grands et plus distincts les objets proches ou éloignés. Mais Porta n'indiqua pas la maniére de combiner les verres, et toute la question est là ; de plus, la maniére dont il raisonne prouve qu'il n'a pas fait l'expérience.

Galilée, ayant entendu parler de la lunette grossissante, en devina la construction, vers 1609, et eut l'idée heureuse de la tourner vers le ciel. C'est alors qu'il découvrit les taches du soleil, les montagnes de la lune, les phases de Vénus, les étoiles de la voie lactée, les nébuleuses.... Ces découvertes se suivaient si rapidement, qu'il dut publier un écrit périodique, *nuntius sidereus*, pour les faire connaître au monde savant. La plus forte lunette qu'il ait employée, avait 4 pieds de long, et ne grossissait que 30 à 32 fois.

Kepler trouva, par la théorie, la lunette à oculaire convergent ; mais il ne l'expérimenta pas. Ce fut le P. Scheiner qui la construisit le premier. Pour éviter l'aberration chromatique, il fallait donner à l'objectif un très long foyer ; on l'installait d'une manière mobile au haut d'un mât, et on le liait à l'oculaire par une longue barre de bois. Il n'y avait pas de tuyau, et l'observateur était forcé de se déplacer sur des échafaudages ou sur des échelles pour suivre les astres dans leurs mouvements. C'était là ce qu'on appelait une *lunette*

aérienne. — L'idée de réunir deux lunettes pour regarder avec les deux yeux, comme on le fait dans les *jumelles* ou *binocles*, est très ancienne ; car les États de Hollande demandèrent à Lipperson un instrument dans lequel on pût regarder avec les deux yeux ; ce qu'il parvint à exécuter.

2209. DES TÉLESCOPES A RÉFLEXION. — L'idée d'employer, au lieu de lentille, un miroir sphérique concave, pour former l'image aérienne destinée à être grossie par l'oculaire, s'est présentée peu de temps après l'invention des lunettes; car le P. Zucchi annonce dans un ouvrage publié en 1652, qu'il avait songé, dès 1616, à cette application. Mais la tête de l'observateur placé devant le miroir pour observer l'image aérienne, interceptait la majeure partie de la lumière incidente. Gregori, en 1663, a fait disparaître cet inconvénient au moyen d'un second miroir concave. Néanmoins, la grande perte de lumière qu'occasionne la réflexion, avait fait attacher peu d'importance à ces divers essais, lorsque Newton, après avoir découvert l'*aberration de réfrangibilité* des lentilles, reconnut tout l'avantage des miroirs, qui ne la présentent pas. En 1772, il présenta à la Société royale de Londres un télescope à réflexion, qui

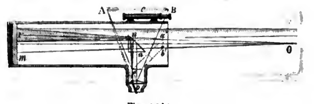


Fig. 1640.

l'emportait notablement sur les lunettes de mêmes dimensions, tant pour la netteté des images que pour le grossissement. Cependant le premier télescope un peu fort n'a été construit qu'en 1718, par Hadley; cet instrument produisait le même effet qu'une lunette de 37 mètres de foyer.

Les miroirs des télescopes se font avec un alliage cassant, qui réfléchit 60 pour cent environ de la lumière incidente ; il est formé de cuivre et d'étain, avec un peu d'arsenic et de platine [1]. Rochon a fait des miroirs en platine contenant 0,2 d'alliage, qui lui ont donné les meilleurs résultats.

Télescope de Newton. — Cet instrument se compose d'un miroir sphérique concave *mr* (*fig.* 1640) dont le centre est en O, et qui réfléchit les rayons partant d'un objet éloigné, de manière à en donner une image réelle renversée *a'b'*, située un peu au-delà du foyer principal (1932). Mais avant le lieu de cette image, les rayons convergents qui tendent à la former, sont

[1] Les proportions de ces métaux ne sont pas toujours les mêmes. Passement indique 20 de cuivre, 9 d'étain et 8 d'arsenic blanc ; Hadley, 2 de cuivre, 1 de laiton et 1 d'étain ; Edwards, 32 de cuivre, 15 d'étain, 1 de laiton; 1 d'argent, 1 d'arsenic. Cette dernière composition est la plus réfléchissante, mais elle est trop cassante pour les grands miroirs.

reçus par un petit miroir plan *nn*, incliné à 45° sur l'axe principal du miroir sphérique, de manière que l'image réelle est rejetée latéralement en *a*, où on la grossit au moyen de l'oculaire *o*. Le miroir *nn* est ordinairement remplacé par la face hypothénuse d'un prisme rectangulaire.

On a ombré, sur la figure, le pinceau lumineux, qui, réfléchi en *r* par le miroir *mr*, puis par le prisme *nn*, entre en *o* dans la pupille, et fait voir l'image A de l'extrémité de l'objet correspondante au point *a'*.

Si l'on représente par F et *f* les distances focales du miroir *mr* et de l'oculaire, le grossissement sera représenté pour F : *f*, comme pour la lunette astronomique. — L'observateur ne regardant pas dans la direction de l'objet, un chercheur *c* (2198) est indispensable pour pointer l'instrument.

2210. Télescope de Gregori. — Cet instrument se dirige vers l'objet que l'on observe, et donne les images droites. Le miroir concave M (*fig.* 1641) est percé à son centre de figure, d'une ouverture à laquelle on ajuste le tube

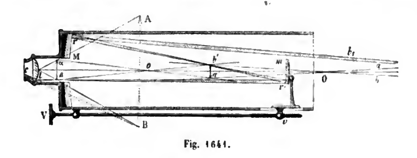


Fig. 1641.

oculaire. Au-delà de l'image focale réelle *a'b'* est disposé un petit miroir sphérique concave *m*, à une distance telle que l'image *a'b'* soit entre son foyer principal et son centre *o*, de manière que la distance des deux miroirs est un peu plus grande que la somme de leurs distances focales. Les rayons qui se croisent aux différents points de l'image *a'b'*, sont réfléchis par le miroir *m*, et vont faire en $\alpha\beta$, au-delà du centre *o*, une image renversée de *a'b'*. Cette image $\alpha\beta$, réelle et grossie (1933), est observée avec l'oculaire *l*. La position de l'image $\alpha\beta$ dépendant de la distance de *a'b'* au miroir *m*; on met au point en le déplaçant au moyen d'une vis de rappel V*v*; une fente pratiquée dans le tuyau du télescope permet ce déplacement. — On a ombré sur la figure, le pinceau de rayons $b_1rb'r'\beta lc$ qui, partant de l'extrémité inférieure de l'objet, fait voir son image en B.

Calcul du grossissement. — Le grossissement dépend des courbures des deux miroirs, de leur distance, et du foyer *f* de l'oculaire. Si cet oculaire était employé à grossir directement l'image *a'b'*, le grossissement serait F : *f* comme pour le télescope de Newton. Mais il faut ici le multiplier par le grossissement occasionné par le petit miroir *m*. Or, le rapport entre les images *a'b'* et $\alpha\beta$ est

égal à $\frac{a}{p-a}$ (1933), a étant le foyer du miroir m, et p la distance $a'm$. En appelant d la distance des miroirs, et supposant que l'image $a'b'$ soit au foyer principal du miroir M, on a $p = a'm = d - F$. Substituant, il vient $\frac{a}{p-a} = \frac{a}{d-F-a}$. Le grossissement est donc $\frac{F}{f} \frac{a}{d-F-a}$. On voit qu'il dépend de la distance des miroirs. — Quand on éloigne le miroir m, son centre o se rapprochant de l'image $a'b'$, l'image $\alpha\beta$ se rapproche aussi de o et s'éloigne de l'oculaire; c'est ce qu'il faut faire pour les vues longues. Au contraire, on rapproche le miroir m pour les vues courtes.

2211. Télescope de Cassegrain. — Le télescope de Cassegrain diffère du télescope de Grégori, en ce que le petit miroir, n (*fig.* 1642), est convexe et placé entre le grand miroir mm et le lieu où se ferait l'image focale $a'c'$. Les rayons que reçoit le miroir n étant convergents, si la distance na' est

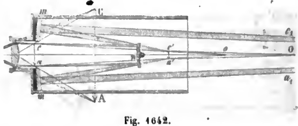


Fig. 1642.

moindre que sa distance focale (1931), il donnera une image réelle ac que l'on observera à la loupe. Les extrémités de cette image seront situées sur les axes oa' oc' ; elle sera donc renversée comme $a'c'$. C'est sans doute pour cela que le télescope de Cassegrain est peu employé, quoiqu'il soit plus court que le télescope grégorien, et que les aberrations de sphéricité des deux miroirs se compensent en partie. On voit, sur la figure, les pinceaux a_1, c_1, qui, partis des extrémités de l'objet, font voir leur image A et C.

2212. Télescope d'Herschel. — La découverte des lentilles achromatiques avait fait généralement renoncer aux télescopes à réflexion. On leur reprochait de donner peu d'éclat à l'image, à cause de la perte de lumière aux deux réflexions ; aussi faut-il donner au grand miroir une largeur double de celle d'un objectif lenticulaire capable de supporter le même grossissement. En outre les miroirs se ternissent rapidement, et donnent plus d'aberration de sphéricité que les lentilles, et enfin ils sont d'un poids très incommode, à cause de la grande épaisseur qu'il faut leur donner à cause de leur fragilité. Plus tard, la difficulté d'obtenir de grands disques de verre a fait revenir aux miroirs. W. Herschel, d'abord simple amateur, les a portés à un grand degré de perfection. Il se livra avec ardeur à la construction de miroirs de plus en plus grands, qu'il polissait lui-même par des procédés particuliers, de manière

à leur donner la courbure la plus favorable. D'abord, il renvoyait l'image latéralement, suivant la méthode de Newton; mais plus tard, en 1786, il supprima le prisme et se contenta d'incliner légèrement le miroir *m* (*fig.* 1643) sur l'axe de l'instrument, comme l'avait déjà fait Jacques Lemaire, en 1728, de manière que le miroir, formant comme une portion d'un miroir plus grand dont l'axe principal eût été l'arête inférieure du tuyau, l'image se formait près du bord de l'ouverture, où se trouvait l'oculaire, *o*; c'est ce qu'il appelait *front-view telescope*. W. Herschel a reconnu que la suppression de la réflexion sur le miroir plan augmentait la force pénétrante de certains télescopes, dans le rapport de 61 à 75, de manière à permettre de distinguer des astres très faibles et invisibles quand il y avait une seconde réflexion. C'est par centaines qu'il faut compter les miroirs travaillés par W. Herschel. Il en a construit 200 de 2m,13 de foyer; 150, de 3m; 80, de 6m. Après avoir fait de nombreuses découvertes dans le ciel, il entreprit un miroir de 10m de foyer; puis, encouragé par le roi Georges III, il en commença, en 1785, un de 12 mètres, qui fut terminé et amené à sa dernière perfection en 1789. Ce miroir avait 1m,47 de largeur. Il rassemblait tant de lumière, que la nébuleuse d'Orion produisait le même éclat que l'atmosphère en plein midi, et qu'on put porter le grossissement à 6000 fois en diamètre, et même à 6652; ce qui dépassait de beaucoup les limites que l'on avait cru devoir assigner aux grossissements possibles, parce qu'on croyait que les pinceaux émergeant de l'oculaire, dont la section est d'autant plus petite que le grossissement est plus fort, ne pouvaient former d'image nette sur la rétine quand ils étaient trop fins. Du reste, ce n'était qu'après une contemplation assez longue d'un même objet, qu'on pouvait parvenir à voir nettement avec de semblables grossissements. Le miroir *m* (*fig.* 1643) était placé au fond d'un tuyau en tôle, soutenu par un système de mâts inclinés, portés eux-mêmes par une plate-forme de 13 mètres de diamètre, pouvant tourner sur 24 rouleaux. Un système de cordages et de poulies permettait de faire varier l'inclinaison du tuyau, et l'observateur se plaçait dans une petite galerie suspendue à son ouverture. On trouve dans l'*Histoire des mathématiques* de Montucla, t. III, un dessin de cette immense machine, qui était installée dans un jardin, à Slough, entre Londres et Windsor, le lieu du monde, comme on l'a dit, où il a été fait le plus de découvertes dans le ciel.

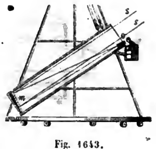


Fig. 1643.

Lord Rosse a construit, en 1842, à Birr ou Parsonstown, en Irlande, un télescope dont les proportions dépassent de beaucoup celles du grand télescope d'Herschel. Le miroir a 1m,83 de largeur et 16m,76 de foyer. Il pèse 3800 kil. Lord Rosse, qui l'a travaillé lui-même, par des procédés de son invention, a dû, pour faire disparaître l'aberration, s'éloigner un peu de la forme sphérique,

mais d'une quantité tellement faible qu'elle ne va qu'à 0mm,0025 près du bord. Le tuyau, en bois cerclé de fer, pèse 6600 kil., ce qui fait, avec le miroir, 10400 kil. Il est installé entre deux murs parallèles au méridien, entre lesquels il peut s'incliner plus ou moins et recevoir un mouvement latéral, au moyen de chaînes passant sur des poulies et s'enroulant sur des treuils. L'extrémité inférieure du tuyau repose sur une pièce à charnière en fonte à double mouvement, fixée sur un massif en pierre fondé profondément [1].

2213. Télescopes à miroir de verre. — M. L. Foucault a récemment rappelé fortement l'attention sur les télescopes à réflecteurs, en substituant aux miroirs métalliques, des miroirs de verre argentés qu'il travaille de manière à faire disparaître toute aberration de sphéricité. Après avoir donné au miroir la forme sphérique, il lui donne peu à peu une forme elliptique de plus en plus allongée, par des retouches successives et locales. Un point lumineux étant placé un peu en deçà du centre, il polit la surface du miroir jusqu'à ce que l'image focale, qui se forme un peu au-delà du centre, soit bien nette ; puis, rapprochant le point lumineux, du miroir, il recommence l'opération de manière à lui donner une forme elliptique plus allongée ; et ainsi de suite, jusqu'à obtenir la forme parabolique. Ces miroirs, argentés en dedans par les procédés chimiques, donnent une netteté et une clarté surprenantes. D'après M. Steinheil, qui a, de son côté, eu l'idée des miroirs en verre argenté, la proportion de lumière réfléchie est environ trois fois plus grande, sous l'incidence de 45°, qu'avec les meilleurs miroirs en alliage ordinaire. M. L. Foucault a constaté qu'un de ses miroirs ayant 11cm de diamètre et 52cm de foyer, supporte un grossissement de 150 à 200 fois, avec une lumière suffisante pour les objets terrestres. Un réfracteur équivalent devrait avoir 9cm de diamètre, et être deux fois plus long ; il coûterait plus du double. Avec un miroir de 33cm de diamètre seulement et de 2m,25 de foyer, monté à la manière de Newton (2209), on a pu dédoubler l'étoile bleue qui accompagne γ d'Andromède ; résultat qui ne pouvait s'obtenir qu'avec les plus grands réfracteurs. Ajoutons que M. Foucault emploie, au lieu de l'oculaire ordinaire, un microscope composé, de manière à ne pas introduire de nouvelles aberrations dans une image qui en est complètement exempte.

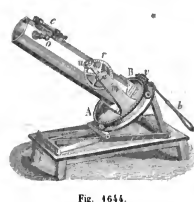


Fig. 1644.

M. L. Foucault a construit pour l'observatoire de Paris un grand télescope

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (1845), p. 57.

à miroir argenté dont le diamètre a 80 centimètres d'ouverture, et qui a permis de distinguer l'astre qui accompagne l'étoile de *Sirius* et que faisait soupçonner son mouvement périodique ; astre qui n'avait pu être encore distingué qu'au moyen du grand réfracteur de Cambridge, par M. Clarke. Le grand télescope de l'Observatoire doit être monté à la manière des lunettes parallactiques, c'est à dire de manière à suivre les astres dans leur mouvement diurne. La *figure* 1644 donnera une idée du mode d'installation. AB est une plate-forme parallèle à l'équateur, et pouvant tourner autour de son centre sur des galets. Deux montants, dont un se voit en *m*, supportent le tuyau du télescope, qu'on peut incliner plus ou moins, de quantités angulaires mesurées sur le cercle divisé *r* au moyen du vernier *u*. En *o*, est l'oculaire, et en c un chercheur. Quand l'astre se trouve dans le champ de l'instrument, on le lui fait suivre en faisant tourner la vis sans fin *v* au moyen de la baguette *b* à charnière universelle. La vis sans fin agit sur une couronne dentée, dont elle peut s'écarter quand on veut faire tourner rapidement la plate-forme AB.

2214. Microscopes catadioptriques. — On peut, dans le *microscope composé*, former, au moyen d'un miroir, l'image réelle qui doit être grossie par l'oculaire. La *figure* 1640 peut servir à faire comprendre une des dispositions adoptées. Supposons que la lentille *o* étant enlevée, on place en *a* l'objet à observer ; il s'en formera une image réelle renversée, au-delà du centre O, et l'on pourra faire en sorte, en éloignant l'objet *a* du prisme *nn*, que cette image grossie ne soit pas trop éloignée du point O. Il restera à adapter le tube oculaire à une distance convenable pour grossir et voir nettement l'image réelle. Les microscopes d'Amici et de Ch. Chevalier sont souvent munis d'une pièce de rechange qu'on met à la place de la pièce *k*(*fig.* 1621), et qui porte à son extrémité un miroir concave, et, au-dessus du porte-objet, un petit prisme qui renvoie vers ce miroir les rayons partant de l'objet.

Le télescope de Cassegrain peut aussi se changer facilement en microscope catadioptrique ; il suffit d'enlever l'oculaire (*fig.* 1642) et de mettre l'objet à la place de l'image *ca*, mais beaucoup plus loin du miroir *n*, afin que l'image réelle qu'il formera au-delà du centre O du miroir *mm*, ne soit pas trop éloignée ; cette image est observée avec un large oculaire.

Les microscopes catadioptriques présentent l'avantage que l'objet étant très éloigné de l'extrémité de l'instrument, il est beaucoup plus facile d'éclairer en dessus les objets opaques.

CHAPITRE VI.

SYSTÈME DES ONDULATIONS. — COMPARAISON A CELUI DE L'ÉMISSION.

..... Qui se fût imaginé qu'on en viendrait à supposer que l'obscurité pourrait être engendrée en ajoutant de la lumière à de la lumière ?

(ARAGO, *Éloge d'Young*).

2215. Jusqu'à présent, nous avons rattaché tous les phénomènes lumineux à quelques faits élémentaires, et à leurs lois données par l'expérience. Nous allons actuellement examiner comment ces faits eux-mêmes peuvent s'expliquer en partant des hypothèses que l'on a faites sur la nature de l'agent lumineux. Nous trouvons ici deux systèmes en présence : celui des *ondulations* et celui de l'*émission*. Nous examinerons comment la réflexion, la réfraction et la dispersion, peuvent s'expliquer dans ces deux systèmes; nous les comparerons l'un à l'autre, et après avoir montré que le premier peut seul se concilier avec certains faits, nous l'adopterons, pour nous servir de guide dans l'étude des phénomènes qui seront l'objet des chapitres suivants.

§ 1. DU SYSTÈME DES ONDULATIONS.

I. Principes du système des ondulations.

2216. Dans le système des ondulations, dont nous avons déjà fait connaître les bases (1866), on admet que l'impression de lumière est produite par les *vibrations de l'éther* venant ébranler la membrane nerveuse qui tapisse le fond de l'œil. Nous avons parlé, au commencement du livre de la chaleur (II,683), de l'hypothèse de l'*éther*, milieu universel, très élastique et très peu dense, remplissant les pores des corps pondérables, qui l'attirent et l'accumulent autour de leurs molécules, où il possède une densité plus grande que dans le vide. Cette densité, différente d'un corps à l'autre, peut aussi varier dans un même corps quand il n'est pas homogène.

Les molécules des corps lumineux sont animées de mouvements vibratoires particuliers, d'une amplitude insensible, se communiquant à l'éther qui les transmet, avec une vitesse de 77000 lieues par seconde environ (1876) ; de même que l'air transmet les vibrations des corps élastiques, avec une vitesse de 337^{m}. De la rapidité plus ou moins grande de ces vibrations résultent les différentes couleurs ; et de leur amplitude, l'intensité de la lumière.

Le mode de propagation des ondulations lumineuses doit se concevoir comme celui des ondes sonores, et tout ce que nous avons dit de ces dernières, de la longueur d'ondulation, de la surface de l'onde, du croisement des rayons, et du principe de la coexistence des petites oscillations, s'applique aux vibrations de l'éther. — Il y a cependant une différence fondamentale, à laquelle les faits nous conduiront plus tard ; c'est que les mouvements vibratoires de l'éther, au lieu de s'accomplir perpendiculairement à la surface de l'onde, ou suivant la direction de la propagation, ont lieu transversalement à cette direction, comme les ondulations produites à la surface de l'eau nous en offrent un exemple familier. Nous n'aurons, du reste, à considérer la direction particulière des mouvements vibratoires, que dans les chapitres où nous traiterons de la *polarisation* de la lumière ; les questions que nous étudierons d'abord en sont entièrement indépendantes.

La formule de Newton $v = \sqrt{\frac{e}{d}}$, qui exprime que la vitesse de propagation du mouvement vibratoire est égale à la racine carrée du rapport de l'élasticité à la densité du milieu ébranlé (I, 504), nous montre que, v étant extrêmement grand quand il s'agit de la lumière, il faut qu'il en soit de même de l'élasticité de l'éther, et que la densité de ce milieu soit excessivement petite ; et, en effet, la résistance de l'éther n'a pas modifié sensiblement les mouvements des planètes depuis l'époque où l'on a commencé à les observer. On voit que, dans la théorie des ondulations, la lumière n'est pas une matière, pas plus que le son, mais un mouvement vibratoire excité dans l'éther. Les phénomènes et leurs lois découlent directement de cette théorie ; ils en sont des conséquences nécessaires. On lui a appliqué le calcul, et les résultats auxquels on est arrivé ont toujours été d'accord avec ceux de l'expérience, même dans leurs valeurs numériques ; ce qui est le cachet d'une bonne théorie. Enfin, les phénomènes s'expliquent si naturellement qu'on aurait pu les prévoir au moyen du calcul, comme cela a, du reste, eu lieu dans plusieurs circonstances, où la théorie a devancé l'expérience.

Pendant longtemps la théorie des ondulations est restée frappée de défaveur, à cause de la difficulté qu'on trouvait à concevoir les mouvements vibratoires, et de l'impuissance dans laquelle se sont trouvés longtemps les géomètres, de pouvoir plier le calcul à ces sortes de mouvements, et d'en exprimer les propriétés par des formules. On trouvait aussi des objections dans la comparaison avec la théorie du son, parce qu'on n'avait pu reproduire avec les vibrations de l'air, les phénomènes correspondant à certaines propriétés de la

lumière. Par exemple, Newton a fait remarquer que, d'après le système des ondulations, il ne devrait pas y avoir d'ombres, puisque le son contourne les obstacles, et se propage derrière eux; mais nous avons vu qu'il n'en est ainsi que dans le cas où l'obstacle est élastique. Quand cet obstacle n'est pas susceptible de vibrer, et qu'on opère en pleine campagne, dans un lieu où il n'existe pas de surfaces réfléchissantes, il y a une *ombre sonore* (I,520). Nous verrons aussi que, si le silence n'est pas complet dans l'ombre sonore, l'obscurité n'est pas non plus complète dans l'ombre produite par la lumière. — On a remarqué aussi que le son se propage dans un tube contourné, dans une gouttière (I,528); il devrait donc en être de même de la lumière. Or, c'est précisément ce qui a lieu quand l'intérieur du tube est poli de manière à réfléchir la lumière (1911). — L'impossibilité, dans laquelle on s'est trouvé pendant longtemps, de produire la réfraction et l'interférence des rayons sonores, a aussi fait supposer qu'il ne pouvait pas y avoir analogie entre la lumière et le son. Or, nous savons comment on est enfin parvenu à produire ces phénomènes avec l'air en vibration (I, 519,523). — On a aussi présenté une très forte objection, relative au phénomène de la *dispersion*. Nous verrons plus loin comment on y a répondu (2243).

Les analogies entre le mode de propagation de la lumière et celui du son, si frappantes quand on considère le phénomène de la réflexion et ses lois, se montrent donc également dans les autres phénomènes. Malheureusement, tandis qu'il est facile de mettre en évidence les vibrations des corps sonores et celles qu'ils excitent dans l'air, on ne peut donner de preuve directe des vibrations des molécules des corps lumineux et de celles de l'éther; ce qui paraît tenir à la petitesse extrême de l'amplitude de ces vibrations, et à la nature toute spéciale du milieu subtil qui les transmet. Mais il y a des conséquences tellement directes de l'existence de ces vibrations, que la vérification expérimentale de ces conséquences peut être considérée comme une preuve, *à posteriori*, de leur réalité. Les plus remarquables, les plus directes de ces conséquences, nous sont fournies par le *principe des interférences*, dont nous éprouverons la fécondité merveilleuse.

Aujourd'hui, la théorie des ondulations, surtout depuis les beaux travaux analytiques de Cauchy, forme un monument scientifique admirable, dont Fresnel a été le Newton, et qui ne le cède en rien à la théorie de la gravitation, tant par la magnificence de l'ensemble que par la perfection des détails.

2217. PRINCIPE D'HUYGHENS. — Pour expliquer un grand nombre de phénomènes lumineux dans la théorie des ondes, il faut s'appuyer sur deux principes que nous allons d'abord faire connaître : le *principe des interférences* et le *principe d'Huyghens*. Commençons par ce dernier :

Quand un point lumineux *s* (*fig.* 1645) ébranle l'éther qui l'environne, chaque pulsation donne naissance à une onde sphérique, *mn*, sur toute la surface de laquelle l'éther se trouve au même instant dans la même phase de vibration. Cette surface s'étend progressivement, avec une extrême rapidité,

en conservant toujours son caractère, et toutes les normales à cette surface forment autant de rayons lumineux. Il résulte de l'élasticité de l'éther et de la facilité avec laquelle un ébranlement s'y propage, que les vibrations des différents points de la surface de l'onde ne sont pas indépendantes les unes des autres, et que les rayons ne peuvent être considérés comme marchant isolément. Cela posé, Huyghens établit en principe qu'on peut regarder tous les points de la surface d'onde, considérée dans une certaine position, *mn*, comme autant de centres d'ébranlement produisant des ondes sphériques secondaires, qui, s'étendant toutes avec la même rapidité, auront pour surface enveloppe, c'est-à-dire pour surface de l'onde générale, une surface sphérique *m'n'*, par laquelle on pourra remplacer la surface *mn* arrivée à la distance *sa* du point lumineux *s*. Il résulte de là que, si l'on considère un point P placé à une certaine distance de la surface *mn*, on pourra considérer l'ébranlement qui lui est communiqué par cette surface quand elle l'atteint, comme produit par le concours de toutes les ondes secondaires émanant des différents points de *mn*.

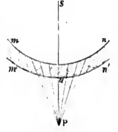


Fig. 1645.

Voici comment Fresnel énonce le principe d'Huyghens[1] : *Les vibrations d'une onde lumineuse, dans chacun de ses points, peuvent être regardées comme la résultante des mouvements élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérée dans l'une quelconque de ses positions antérieures.*

Il résulte de ce principe que, si nous supposons la surface d'une onde, arrivée à une ouverture pratiquée dans un écran, le faisceau transmis ne devrait pas être limité à la surface du cône s'appuyant sur le contour de l'ouverture, et ayant son sommet au point lumineux, comme l'indique le principe de la propagation de la lumière en ligne droite, mais que des ondulations devront se propager en dehors de ce cône. C'est, en effet, ce qui a lieu, comme nous le verrons en étudiant la *diffraction*. Quand on excite des ondes circulaires sur l'eau, et qu'on oppose à leur propagation un mur vertical présentant une ouverture, on a une image de ce qui se passe relativement aux ondulations de l'éther : on voit des ondes se propager sur l'eau au-delà de l'ouverture, comme si chacun des points de la surface de l'eau qui s'y trouvent contenus étaient des centres d'ondulations. Du reste, comme l'ouverture a toujours une certaine étendue, et contient, par conséquent, un grand nombre de centres d'ondes secondaires, il arrive que, par la combinaison des ondulations provenant des différents points, la lumière diminue rapidement d'intensité à mesure qu'on s'éloigne des limites géométriques du faisceau qui passe par l'ouverture, et même cette diminution n'est pas continue, mais se fait par des alternatives

[1] Supplément à la *Traduction du système de chimie* de M. Thomson, p. 50.

de parties sombres et plus brillantes, comme nous le verrons en étudiant la diffraction.

2218. Onde rencontrant la surface de séparation de deux milieux. — Quand la surface de séparation de deux milieux est rencontrée par la surface d'une onde lumineuse, le mouvement vibratoire qui réside à cette dernière surface, se communique aux molécules de la surface de séparation, et chacune de ces molécules agissant à son tour sur l'éther, devient un centre d'ébranlement d'où naissent deux systèmes d'ondes; les unes qui se propagent dans le premier milieu, les autres dans le second, avec des vitesses qui dépendent de la densité qu'y possède l'éther. Ce principe se démontre par l'analyse mathématique; le phénoméne du son nous en montre une application sensible : si l'on produit des ondes sonores dans le voisinage d'une corde tendue, d'une membrane, elles entrent en vibration, et, agissant à leur tour sur l'air qui les environne, y produisent des ondes nouvelles, dont on reconnaît l'existence par le timbre particulier que prend le son.

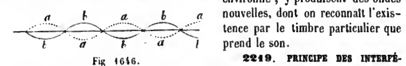


Fig 1646.

2219. Principe des interférences. — On dit qu'il y a *interférence* entre deux rayons de lumière qui marchent suivant la même direction, quand ils s'entre-détruisent de manière à produire de l'obscurité. Ce phénomène, tout-à-fait inexplicable dans le systéme de l'émission, est, au contraire, une conséquence tellement directe de celui des ondulations, qu'il avait été posé en principe avant que l'expérience ne l'eût constaté.

Considérons deux rayons de même intensité et correspondant à des longueurs d'ondulation égales; supposons que ces rayons suivent sensiblement la même route, et représentons par des courbes *aaa*..., *bbb*... (*fig.* 1646), les vitesses de vibration qui animent l'éther à un instant donné, aux différents points de ce rayon, et supposons que la longueur d'ondulation λ corresponde à une *vibration complète*, aller et retour, de la molécule d'éther. Si les vibrations des deux rayons coïncident, leurs intensités s'ajouteront; mais si, par une cause quelconque, l'un des rayons se trouvait en retard sur l'autre d'une demi-longueur d'ondulation $\frac{1}{2}\lambda$, une même molécule d'éther, se trouvant sollicitée en même temps et avec la même force dans deux directions opposées, resterait en repos, et *la réunion des deux rayons produirait de l'obscurité*. Il en serait de même si deux rayons étaient en retard l'un par rapport à l'autre d'un nombre *impair* de fois $\frac{1}{2}\lambda$; au contraire, les intensités s'ajouteraient, si le retard était d'un nombre *pair*. Si ce retard était enfin d'un nombre fractionnaire de fois $\frac{1}{2}\lambda$, l'intensité lumineuse serait augmentée si la fraction était plus grande que $\frac{1}{2}\lambda$, et diminuée, dans le cas contraire. — Si l'intensité des rayons n'est pas la même, il n'y a pas interférence compléte, mais seulement un minimum d'intensité égal à la différence des intensités des deux rayons. Enfin, tout cela aurait encore lieu, si les rayons formaient entre eux un angle très petit.

Le principe des interférences avait été indiqué par Hook, mais c'est Thomas Young qui, le premier, en a nettement exposé la théorie dans le système des ondulations, et c'est lui qui a imaginé le mot *interférence* ; c'est pourquoi on le regarde généralement comme l'auteur de ce principe, sur lequel nous nous appuierons pour expliquer une foule de phénomènes.

2220. Manière d'observer l'interférence de deux rayons. — Considérons deux points lumineux *s*, *s'* (*fig.* 1647) très rapprochés l'un de l'autre, et produisant dans l'éther des ondulations *de même longueur* et toujours dans la même phase de vibration au moment où elles naissent à chacun de ces points. Imaginons deux séries de surfaces sphériques ayant *s* et *s'* pour centres, et dont les rayons diffèrent deux à deux de $\frac{1}{2}\lambda$. Ces surfaces couperont le plan de la figure suivant deux systèmes d'arcs, dont les uns *o*, *e*, *o'*, *e'*,.... ayant leur centre en *s'*, croiseront les autres. Deux arcs consécutifs o, *e*, l'un en ligne ponctuée, l'autre en ligne continue, sont séparés par un espace égal à $\frac{1}{2}\lambda$, et deux arcs consécutifs tracés en lignes identiques, par un intervalle égal à λ. On a beaucoup exagéré ces intervalles pour rendre la figure distincte.

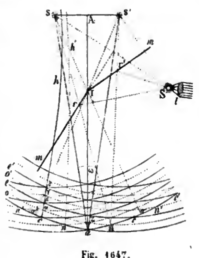


Fig. 1647.

Cela posé, considérons le point *a* situé sur la perpendiculaire A*a* menée au milieu de *ss'*. Les deux rayons *sa*, *s'a* ayant la même longueur, se trouvent en *a* dans la même phase de vibration, comme aux points de départ, et leurs intensités s'ajoutent. Au point *c*, où se rencontrent deux arcs en ligne continue, la différence de phase des rayons *sc*, *s'c* est égale à λ, les distances *s'c* et *sc* différant de cette quantité λ. Les intensités de ces rayons s'ajouteront donc encore ; il en sera de même en *c'*, et partout où deux arcs tracés en trait continu se rencontrent. Mais en *n*, la différence de route des deux rayons *ns*, *ns'* étant $\frac{1}{2}\lambda$, les rayons se trouvent dans des phases contraires ; il y aura donc opposition dans le sens des ébranlements imprimés à l'éther, et par suite obscurité. Il en sera de même en *n'*, où la différence de route est $\frac{3}{2}\lambda$, et en général dans tous les points où se coupent deux arcs tracés avec un trait différent. La distance *ss'* étant très petite, par rapport à A*a*, la surface *a'n'* se confond sensiblement avec un plan. Si donc on place en *an'* un carton blanc, on aura dans le plan de la figure une série de points lumineux *c*, *c'*... séparés par des espaces obscurs *n*, *n'*...

Si, au lieu de points lumineux, on suppose en *s*, *s'* deux traits lumineux

perpendiculaires au plan de la figure, on aura en *an'* une série de bandes parallèles à ces traits, alternativement lumineuses et obscures, et désignées sous le nom de *franges*.

Si l'on intercepte les rayons qui viennent d'une des sources lumineuses, l'intensité des franges brillantes sera diminuée de moitié, et la lumière reparaîtra dans les bandes obscures. Si l'on enlève l'écran, l'obscurité reparaîtra dans ces dernières ; d'où l'on voit que *de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité*.

Conséquences. — Si l'on rapproche le carton, des points s, s', les franges du même ordre, c, α, β, γ, δ... par exemple, se rapprocheront peu à peu de la ligne Aa, et comme la différence des distances des points c, α, β, γ, δ... aux points s et s' est constante et égale à λ, on voit que ces points formeront une hyperbole *ch*, dont les foyers seront en s et s'. — Il nous reste à montrer comment on a pu réaliser les conditions expérimentales dont nous venons de parler, et obtenir des franges d'interférence.

2221. Expérience de Grimaldi et Young. — La première condition à remplir, est d'avoir deux points lumineux, ou deux traits lumineux très étroits, émettant de la lumière simple et donnant des pulsations de même rapidité et d'accord entre elles, c'est-à-dire toujours dans la même phase de vibration. C'était là la difficulté ; elle se trouve levée dans l'expérience des deux trous de Grimaldi et Young, et dans celle des miroirs de Fresnel.

1° Supposons que s, s' (*fig.* 1647) soient deux fentes parallèles très étroites recevant de la lumière simple d'un trait lumineux, placé au-dessus, à égale distance des fentes et parallèle à leur direction. Les parties de chaque surface d'onde cylindrique, se présentant aux deux fentes, pourront, d'après le principe d'Huyghens (2217), être considérées comme des centres d'ébranlement dont les pulsations seront nécessairement d'accord, et l'on observera la série de franges obscures et lumineuses satisfaisant à toutes les conditions que nous venons de détailler.

Si l'on couvre une des fentes avec un écran, la lumière qui passe par l'autre répandra en *an'* une lumière uniforme, et si l'on enlève l'écran, l'obscurité reparaîtra dans les points où se forment les franges obscures, par le concours des rayons provenant des deux fentes. Ce résultat, inexplicable dans le système de l'émission, avait été observé par Grimaldi, dès 1665 ; mais c'est Young qui a montré comment il découle du système des ondulations.

Quant au moyen d'obtenir un trait lumineux très brillant, et à la manière d'observer et de mesurer les franges pour constater leur trajectoire hyperboliques, on procède comme dans l'expérience suivante.

2222. 2° Expérience de Fresnel. — Pour se procurer deux points lumineux dont les pulsations soient toujours d'accord, Fresnel les remplace par les images d'un seul point lumineux, formées dans deux miroirs plans. Une lentille cylindrique à très court foyer, dont la section droite se voit en l (*fig.* 1647), reçoit un faisceau de lumière simple tamisée à travers une lame

de verre rouge. Cette lentille donne une ligne focale très étroite S, qui doit être parallèle à l'intersection des deux miroirs plans I*m*, I*n*, qui sont à peine inclinés l'un sur l'autre, pour que les images *s*, *s'* soient très rapprochées. Ces miroirs sont en métal ou en verre noir. Les rayons réfléchis sont dans le même cas que s'ils partaient des images *s*, *s'*, et ils donnent, sur un écran placé en *an'*, des franges alternativement brillantes et obscures. C'est Arago qui a eu l'idée d'employer une lentille cylindrique, avec laquelle les franges sont bien plus vives qu'avec une lentille sphérique.

Ces franges, d'abord très nettes, deviennent peu à peu confuses à mesure qu'on s'éloigne de celle du milieu, c'est-à-dire à mesure que la différence de route des deux rayons qui se combinent est plus considérable.

Franges irisées. — L'expérience montre que les franges sont différemment espacées quand on emploie de la lumière simple de différente couleur;

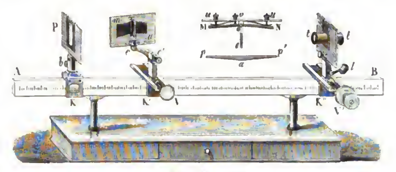


Fig. 1648. — 1/12.

leur distance va en diminuant, des rayons rouges aux rayons violets. Il résulte de là que, si l'on se sert de lumière blanche, chaque couleur formant ses franges particulières en des endroits différents, les couleurs seront séparées, et l'on aura des franges irisées, dans lesquelles le violet sera en dedans, c'est-à-dire du côté de la frange centrale, qui seule reste blanche. C'est, en effet, ce que montre l'expérience; et il en est de même quand on se sert des deux trous d'Young (2221).

2223. Banc de diffraction. — La *figure* 1648 représente un appareil construit par M. Soleil, et nommé *banc* de diffraction, au moyen duquel se font les expériences d'Young et de Fresnel. AB est une règle divisée, sur laquelle on peut faire glisser divers curseurs K, K', K". Le curseur K soutient une plaque P qui porte la lentille cylindrique, et qu'une vis *v* permet de faire basculer sur son support, de manière à placer la lentille bien verticalement. Le curseur K' soutient une plaque à deux fentes verticales, pour l'expérience d'Young, ou les deux miroirs, pour celle de Fresnel. Ces miroirs *m*, *n*, sont portés par une plaque verticale qui peut tourner à l'extrémité d'un levier *cc'*,

mobile lui-même en c'. Une vis de rappel V sert à éloigner plus ou moins le système $cc'm$, de la règle AB. Les miroirs sont représentés à part en MN. Ils sont mobiles autour d'une charnière o; des ressorts tendent à les écarter de la plaque, et des écrous u, u, agissant sur des vis fixées à la partie postérieure des miroirs, servent à faire varier l'angle qu'ils font entre eux. Deux autres écrous, dont un se voit en v, permettent de faire avancer plus ou moins le bord intérieur o de l'un des miroirs, de manière à le faire coïncider exactement avec le bord de l'autre. Cette condition est très importante, autrement les rayons réfléchis près de l'intersection, sur le plus enfoncé des miroirs, seraient interceptés par la saillie que formerait le bord de l'autre. e est un écran destiné à arrêter les rayons qui ne frappent pas la surface des miroirs.

Biprisme. — Au lieu de miroirs, pour se procurer deux images lumineuses, Arago a eu l'idée d'employer un prisme pap' (*fig.* 1648), dont l'angle a est très obtus, et dont la face pp' se place perpendiculairement à la règle AB, sur un support semblable à PK. Ce prisme peut être considéré comme formé de deux prismes pa, ap' qui, déviant les rayons vers leur base commune, les rapprochent de cette base, de manière à les mettre dans le même cas que s'ils partaient de deux points placés sur leur prolongement. Les épaisseurs traversées par les rayons qui aboutissent à une frange non centrale ne sont pas égales entre elles ; mais la différence étant très petite, les franges occupent sensiblement la même place qu'avec les miroirs.

2221. Trajectoire hyperbolique des franges. — Pour vérifier la forme hyperbolique des franges d'un même ordre, observées à différentes distances de ss' (*fig.* 1647), Fresnel a mesuré, par le moyen que nous allons indiquer, les distances x des franges d'un même ordre à l'axe Aa, pour différentes distances y, aux images s, s' ; distances égales à Ia + IA ou z + DA, en représentant IA par D. Il a ensuite posé l'équation générale de l'hyperbole $A^2y^2 - B^2x^2 = -A^2B^2$, ou $A^2(z+D)^2 - B^2x^2 = -A^2B^2$; et, au moyen de trois couples de valeurs x', z' ; x'', z'' ; x''', z''' données par l'observation, il a obtenu trois équations de condition qui lui ont servi à calculer les valeurs des constantes A, B et D. Portant ensuite dans l'équation générale, dont les constantes sont ainsi connues, les différentes valeurs de x et z données par l'observation, il a reconnu qu'elles satisfaisaient à l'équation ; ce qui montre que la trajectoire formée par les franges d'un même ordre, dans le plan sas', appartient à une hyperbole dont le centre est en o. — Si l'on calcule la distance 2C des foyers, en fonction des valeurs de A et B, au moyen de la formule $B^2 = C^2 - A^2$, on trouve que cette distance est égale à ss' ; les points s et s' sont donc bien les foyers de l'hyperbole.

Micromètre de Fresnel. — Pour mesurer la distance des franges, Fresnel, au lieu de les recevoir sur un écran, les observa au moyen d'une loupe portée par un tube tt (*fig.* 1648) et munie d'un fil vertical placé à son foyer. Le support de la loupe peut se déplacer transversalement à la règle AB, au moyen d'une vis micrométrique V'. Après avoir fait coïncider le fil focal avec le milieu

d'une frange, on l'amène au milieu d'une autre frange ; et le nombre de tours qu'a fait la vis fait connaître la distance des deux franges. Pendant ces observations, le faisceau lumineux qui tombe sur la lentille est rendu fixe au moyen d'un héliostat.

2225. Mesure de la longueur d'ondulation. — D'après la construction ci-dessus (*fig.* 1647), la longueur d'ondulation λ est égale à la distance za. Considérons la figure curviligne azc comme un triangle rectangle dans lequel l'hypothénuse ac n'est autre chose que la distance du milieu de la première bande brillante au milieu de la bande centrale a. Les angles zca et $sas' = \omega$ sont égaux, comme ayant les côtés perpendiculaires. On a donc $az = \lambda = \overline{ac} \sin \omega$. Il suffira donc, pour obtenir λ, de mesurer l'angle sas' au moyen d'un cercle répétiteur, et la distance ac au moyen du micromètre de Fresnel.

On voit que λ est proportionnel à la distance ac ; et comme il résulte de l'expérience que les franges sont plus serrées avec la lumière violette qu'avec la lumière rouge, on doit en conclure que les ondes sont plus courtes pour les rayons violets. La formule $\lambda = v : n$, dans laquelle v est la vitesse de la lumière, et n le nombre de vibrations par seconde correspondant aux rayons considérés, montre que la lumière violette est aussi celle dont les vibrations sont les plus rapides. Enfin, l'expression $\lambda = ac \cdot \sin \omega$, qui permet de calculer la largeur des franges en fonction de λ, prouve qu'elles sont d'autant plus larges que l'angle sas' est plus petit. Si cet angle est trop grand, les franges disparaissent ; elles sont encore visibles quand ω est de plusieurs degrés.

On peut aussi déduire la valeur de λ, de l'équation de l'hyperbole qui passe par la frange c ; car λ est la différence des rayons vecteurs de cette hyperbole, différence qui est égale à son demi-grand axe A.

Nous verrons, par la suite, plusieurs autres moyens de mesurer la longueur d'ondulation. Il en est qui permettent de trouver les valeurs de λ correspondantes aux raies principales du spectre. Nous donnons dès à présent quelques-uns des résultats. Les nombres de vibrations ont été calculés en prenant $v = 77000$ lieues par seconde.

RAIES et COULEURS.	VALEURS DE λ en *dixmillièmes* de millimètre.	NOMBRES n de vibrations par seconde, en *trillions*	RAIES et COULEURS.	VALEURS DE λ en *dixmillièmes* de millimètre.	NOMBRES n de vibrations par seconde, en *trillions*.
Raie B.......	6,88	»	*Vert moyen* .	5,12	601
Raie C........	6,56	»	Raie F	4.81	»
Rouge moyen.	6,20	497	*Bleu moyen..*	4,75	648
Raie D.	5,89	»	*Indigo moyen*	4,49	686
Orangé moyen	5,83	528	Raie G	4,29	»
Jaune moyen.	5,51	529	*Violet moyen.*	4,23	728
Raie E........	5,26	»	Raie H........	3,93	»

D'après Fraunhofer, les valeurs de λ pour le rouge et le violet extrêmes sont $0^{mm},000750$ et $0^{mm},000360$, et d'après M. Babinet, 0,000710 et 0,000340. Pour la flamme de la lampe monochromatique, on a trouvé $0^{mm},000,588$. La valeur moyenne de λ est, comme on voit, un peu supérieure à un demi-millième de millimètre; il faut encore plus de 6 feuilles d'or superposées pour former une épaisseur égale.

On voit que le nombre de vibrations se déduit de la longueur de l'onde; tandis que, en acoustique, ce nombre se trouve directement et sert à calculer la longueur d'ondulation. Cette dernière peut cependant s'obtenir directement au moyen des tuyaux sonores, ou par la méthode de M. N. Savart (1,591). Si l'on prend le rapport entre les nombres de vibrations des rayons extrêmes, on le trouve égal à 1 : 1,58 environ. Les limites de sensibilité de l'œil, quant au nombre de vibrations, sont donc beaucoup plus rapprochées que celles de l'oreille; car le rapport ci-dessus est un peu plus faible que celui qui représente la sixte mineure.

2226. Cause qui limite le nombre des franges. — Pour obtenir, dans l'expérience de Fresnel, des franges bien séparées, il faut que le trait lumineux soit très mince; autrement on pourrait le décomposer par la pensée en plusieurs traits fins, donnant chacun leur système de franges. Il ne faut pas cependant que le trait soit trop étroit; car, alors, les franges seraient à peine visibles. Il y a là un milieu à garder, comme pour les dimensions du trou de la chambre noire simple (1874).

Les franges irisées données par la lumière blanche sont bien moins nombreuses que celles qu'on obtient avec la lumière simple. Cela tient à ce que les distances des franges simples qui se superposent dans les franges irisées, ne varient pas de la même manière à mesure que la distance à la frange centrale augmente; elles finissent donc par se mêler, en donnant une lumière uniforme. Les franges simples sont aussi de moins en moins nettes à mesure qu'on s'éloigne de celle du milieu, et finissent par disparaître quand la différence de route des rayons est trop grande. Fresnel a attribué ce résultat au défaut de pureté de la lumière employée; les différences très faibles de longueur d'ondulation des rayons composants n'affectent pas d'abord les résultats, mais quand la différence de route est très grande, les endroits où se font les interférences ne sont plus les mêmes pour ces divers rayons, les bandes sombres de certains d'entre eux reçoivent la lumière de certains autres, et les franges s'effacent. On remarque, en effet, que les franges sont d'autant plus nombreuses qu'on se sert de lumière plus homogène, et l'on peut, au moyen de précautions particulières, obtenir des franges correspondantes à de très grandes différences de route.

2227. Interférences avec de grandes différences de route. — Voici comment MM. Fizeau et Foucault ont obtenu l'interférence avec des différences de route de plusieurs milliers d'ondulations [1]. Les franges, formées par de la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 138.

lumière blanche, au moyen des miroirs de Fresnel, sont reçues sur un écran muni d'une fente étroite parallèle à ces franges. Prenant cette fente pour trait lumineux, on fait passer le faisceau qui en sort, à travers un système de lentilles et de prismes (2032), de manière à obtenir un spectre très pur. Si d'abord la fente reçoit la frange centrale blanche, le spectre est complet, et l'on y distingue les raies de Fraunhofer. Si l'on éloigne la fente de la frange centrale et si on la porte à l'endroit où se formerait la bande obscure des rayons violets, cette couleur manquera dans le spectre, et sera remplacée par une bande noire. En continuant à déplacer peu à peu l'écran, une bande noire apparaîtra successivement dans toutes les couleurs, et semblera sortir par l'extrémité rouge du spectre ; puis la bande reparaîtra dans le violet ; mais celle-ci correspondra à une différence de marche de $\frac{3}{2}\lambda$, et bientôt on verra des bandes simultanément dans plusieurs couleurs, une même différence de longueur des rayons réfléchis par les miroirs et aboutissant à la fente, pouvant contenir les demi-longueurs d'ondulation de ces couleurs un nombre impair de fois, nombre différent pour chacune d'elles.

Au lieu de déplacer la fente, on fait avancer parallèlement à lui-même, le miroir le plus rapproché de l'écran, ce qui fait varier la différence de longueur des rayons réfléchis qui arrivent à la fente, et par conséquent l'ordre de la frange qui la traverse. On voit alors les bandes noires marcher vers l'extrémité rouge du spectre, par laquelle elles semblent sortir, pendant que d'autres, plus nombreuses et plus serrées, se montrent à l'extrémité violette. Au moyen d'une lunette, on peut bientôt en distinguer des milliers.

Calcul de la différence de marche. — Pour connaître la différence de marche qui produit une bande d'interférence, il faut connaître son numéro d'ordre. Il suffit pour cela de compter combien il y a de bandes entre deux raies du spectre correspondantes à des longueurs d'ondulation connues. Soient λ et λ' ces longueurs, et N le nombre de bandes comprises entre les deux raies ; si d est la différence de longueur absolue des rayons qui, réfléchis par les miroirs, aboutissent à la fente, et si n et n' sont les nombres de fois que λ et λ' sont compris dans d, on aura $d = n\lambda = n'\lambda'$. De plus, si λ est compris une fois de plus dans d que λ', il n'y aura que deux bandes noires entre les deux raies, et qu'un seul intervalle entre ces bandes; car aucune couleur intermédiaire ne pourra évidemment interférer entre ces bandes. Si $n' = n + 2$, il y aura trois bandes noires, car une couleur intermédiaire, ayant sa longueur d'ondulation λ'' comprise entre λ et λ', donnera $d : \lambda'' = n + 1$; il y aura donc deux intervalles entre les bandes noires. En général, si N est le nombre de ces intervalles, on aura $n' = n + \mathrm{N}$. Remplaçant n' par cette valeur dans $n\lambda = n\lambda'$, il vient $n = \frac{\mathrm{N}\lambda'}{\lambda - \lambda'}$, et par conséquent $n' = n + \mathrm{N} = \frac{\mathrm{N}\lambda}{\lambda - \lambda'}$. Dans une expérience, on a trouvé $\mathrm{N} = 141$ entre les raies E et F ; ce qui donne, en remplaçant λ et λ' par leurs valeurs, $\frac{\lambda'}{\lambda - \lambda'} = 12{,}32$, et, par suite,

$n = 1738$. Pour l'extrême violet, on trouve, pour la différence de marche, plus de 2000 longueurs d'ondulation.

II. Explication de la réflexion et de la réfraction. — Réfracteurs interférentiels.

2228. EXPLICATION DE LA RÉFLEXION. — En partant du principe d'Huyghens, on explique la réflexion de la lumière, et on en trouve facilement les lois. On peut, pour cela, suivre la marche qui nous a servi à expliquer la réflexion du son (I, 515) ; ou bien employer la méthode suivante dans laquelle on suppose les rayons incidents parallèles, ce qui revient à considérer un faiscean ayant une section infiniment petite. Soit *sabs'* le faisceau incident (*fig.* 1649) et *cb* la surface de l'onde, qui, dans ce cas, est plane et perpendiculaire au faisceau. Quand cette surface arrive en *cb*, le point *b* devient un centre d'ondulations (2218), et quand elle est arrivée en *a*, ces ondulations sont parvenues à nne distance *bd* égale à *ca*. Les ébranlements engendrés par les points intermédiaires à *a* et *b*, quand la surface de l'onde les atteint, se sont aussi propagés à des distances proportionnelles à leur distance au point *a*, de manière qu'un plan tangent, *ad*, à la sphère de rayon *bd*, est aussi tangent aux surfaces des ondes émanant de tous les points de *ab*, et forme, par conséquent, la surface de l'onde réfléchie. En menant les perpendiculaires *ar*, *br'* à cette surface, on a le faisceau réfléchi *rabr'*. — Il est facile de voir que les triangles rectangles *abc*, *bad* sont égaux, et que, par conséquent, les rayons incidents et réfléchis sont également inclinés sur la surface réfléchissante ; d'où l'on conclut la première loi de la réflexion. Quant à l'autre loi, elle résulte de la symétrie de la figure par rapport au plan d'incidence.

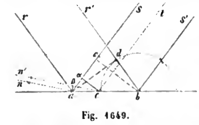


Fig. 1649.

2229. Pourquoi le faisceau réfléchi est limité. — Il se présente ici une difficulté qu'Huyghens, auquel est due l'explication qui précède, n'avait pas résolue : comment se fait-il que le faisceau réfléchi soit limité par les droites *ar* et *br'*, puisque chaque point de *ab* produit des ondes hémisphériques, et, par conséquent, lance des rayons dans toutes les directions ? Fresnel a complété la théorie de la réflexion, en montrant que les rayons dirigés obliquement au faisceau *rabr'* se détruisent mutuellement en interférant entre eux. Considérons, par exemple, le rayon *an* : il y aura toujours un rayon très voisin réfléchi dans la même direction, qui le détruira ; soit *en'* ce rayon. Cherchons quelle condition la distance *ce* doit remplir pour qu'il y ait interférence. Menons *eα* et *aβ* perpendiculaires à *sa* et à *an* ; un ébranlement lumineux du rayon *sa* aura parcouru en arrivant à la surface *ab*, l'espace *αa* de plus que l'ébranlement

correspondant du rayon *te*, mais ce dernier aura parcouru l'espace $e\beta$ de plus que le premier, quand ils arriveront à la surface $a\beta$ de l'onde réfléchie. La différence de route des deux ébranlements arrivant à cette surface, sera donc égale à la différence $e\beta - a\alpha$. Si cette différence est égale à $\frac{1}{2}\lambda$, ou en général à un nombre impair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, les deux rayons s'entre-détruiront. Or, la différence dépend de la distance *ae*, que nous allons calculer. Soit i l'angle d'incidence, égal à αea, et désignons par $\rho = \beta ea$, l'angle que fait le rayon *an* avec la normale. Les triangles rectangles $a\alpha e$, $a\beta e$ donnent $\overline{a\alpha} = \overline{ae} \sin i$, et $\overline{e\beta} = \overline{ae} \sin \rho$; d'où $\overline{e\beta} - \overline{a\alpha} = \overline{ae} (\sin \rho - \sin i)$, et $ae = \frac{e\beta - a\alpha}{\sin \rho - \sin i}$. Pour qu'il y ait interférence, il suffit que $e\beta - a\alpha$ soit égal à $\frac{1}{2}\lambda$, c'est-à-dire que l'on ait $ae = \frac{\frac{1}{2}\lambda}{\sin \rho - \sin i}$. On voit que, plus ρ différera de i, plus les rayons qui se détruisent seront rapprochés l'un de l'autre. Dans tous les cas, *ae* est toujours trés petit, puisque $\frac{1}{2}\lambda$ est extrêmement petit. Si l'on a $\rho = i$, il vient $ae = \infty$, ce qui montre que les rayons qui se réfléchissent en formant avec la normale un angle égal à l'angle d'incidence, ne peuvent s'entre-détruire.

On conçoit que si le bord de droite du miroir était très rapproché du point *a*, le rayon réfléchi *en'* n'existant pas, le rayon *an* ne serait pas détruit. Si donc le miroir était trés étroit, la destruction des rayons obliques au faisceau *rabr'* ne pourrait avoir lieu complétement, et le faisceau réfléchi serait divergent. Cette conséquence de la théorie a été vérifiée par Fresnel : si l'on noircit la surface d'un miroir, en ne laissant à découvert qu'un espace triangulaire trés étroit, cet espace renvoie un faisceau de rayons solaires plus étalé du côté de l'extrémité la plus étroite de la surface réfléchissante, de manière à former sur un écran une image triangulaire à sommet tronqué, et renversée par rapport au triangle réfléchissant.

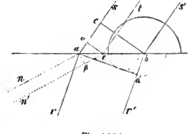


Fig 1650.

2230. EXPLICATION DE LA RÉFRACTION. — Soit *sabs'* (*fig.* 1650), un faisceau incident, que nous supposons cylindrique, et *bc* la surface d'une onde au moment où elle vient rencontrer en *b* la surface *ab* de séparation de deux milieux ; le point *b* va devenir aussitôt un centre d'ébranlements, les uns se propageant dans le premier milieu, et donnant naissance à la lumière réfléchie, les autres se propageant dans le second milieu et constituant la lumière transmise. Soit *bd* la distance à laquelle est parvenu l'ébranlement dans le second milieu, quand la surface *cb* arrive en *a*. Cette distance sera plus petite que *ca*, si nous supposons que la *vitesse* de la lumière est plus petite dans le second milieu que dans le premier. Les divers points de la surface *ab* seront

ébranlés successivement, quand la surface *bc* de l'onde les atteindra, et les distances auxquelles seront parvenus les ébranlements quand cette surface sera arrivée en *a*, seront proportionnelles aux distances de ces points au point *a*. On pourra donc mener par le point *a*, à toutes les surfaces des ondes élémentaires parties des différents points de *ab*, un plan tangent commun *ad* qui représentera la surface de l'onde réfractée, à laquelle le faisceau réfracté *arr'b* sera perpendiculaire.

Les angles d'incidence, *i*, et de réfraction, *r*, étant égaux à *cba* et *bad*, les triangles rectangles *abc* et *abd* donnent $ac = ab \cdot \sin i$, et $bd = ab \cdot \sin r$; d'où $\sin i : \sin r = ac : bd$. Or les espaces $\overline{ac}$ et $\overline{bd}$ étant parcourus dans le même temps, sont entre eux comme les vitesses v et v' de la lumière dans les deux milieux; on a donc $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}$, relation qui exprime la *loi de Descartes*. On voit que l'*indice de réfraction* n'est autre chose que le rapport entre les vitesses de la lumière dans les deux milieux. On a donc $n = v : v' = \lambda : \lambda'$; en représentant par λ et λ' les longueurs d'ondulation dans les deux milieux. Il est facile de voir, sur la *figure* 1650, comment l'explication qui précède a conduit Huyghens à la construction qui donne le rayon réfracté (1951).

2231. Equivalents optiques. — Les espaces *ac* et *bd* (*fig.* 1650) contiennent le même nombre de longueurs d'ondulation, et si l'un est plus court que l'autre, c'est que la valeur de λ y est plus petite. La formule $\frac{ac}{bd} = \frac{v}{v'} = n$ donne $ac = n \times \overline{bd}$. On voit que, pour passer de l'espace *bd* pris dans un milieu dont l'indice est *n*, à l'espace *ac* pris dans le vide et contenant le même nombre d'ondulations, il faut multiplier *bd* par *n*. On peut donc dire que l'espace *bd* dans le milieu, est équivalent à l'espace $n \cdot bd$, dans le vide. Si *bd* était égal à l'unité, l'espace équivalent dans le vide serait *n*, ce qui a fait donner à l'indice de réfraction le nom d'*équivalent optique* de la substance. On nomme donc ainsi le facteur par lequel il faut multiplier un espace pris dans un milieu, pour obtenir l'espace dans le vide, qui contiendrait le même nombre de longueurs d'ondulation.

2232. Pourquoi le faisceau réfracté est limité. — Un rayon *er* qui s'écarte de la direction de ceux qui suivent la loi de Descartes, sera toujours détruit par un rayon voisin parallèle, *en'*, situé à une distance *ae* que nous allons calculer. La différence de route des rayons *ca*, *te*, exprimée en longueurs d'ondulation sera, quand les ébranlements correspondants arriveront à la surface d'onde $a\beta$, égale à $n \cdot \overline{e\beta} - \overline{a\alpha}$; *n* étant l'indice de réfraction (2231). Désignons par *i*, l'angle d'incidence αea, et par ρ l'angle $ea\beta$ du rayon *an* avec la normale; les triangles rectangles $e\beta a$, $e\alpha a$ donneront $e\beta = ae \cdot \sin \rho$; $a\alpha = ae \cdot \sin i$; d'où $n \cdot e\beta - a\alpha = \overline{ae}\,(n \sin \rho - \sin i)$, et $\overline{ae} = \frac{n \cdot e\beta - a\alpha}{n \cdot \sin \rho - \sin i}$.
Il y aura interférence, quand la différence $n \cdot e\beta - a\alpha$ sera égale à $\frac{1}{2}\lambda$; ou

quand on aura $ae = \frac{\frac{1}{2}\lambda}{n \cdot \sin \rho - \sin i}$. On voit que *ae* est d'autant plus petit, que le rapport sin i : sin ρ diffère davantage de n, et qu'il devient infini quand le rayon suivant la loi de Descartes, on a n sin ρ = sin i.

2233. La vitesse est moindre dans le milieu le plus réfringent. — Il résulte de l'explication précédente, que la vitessse de la lumière doit être moindre dans le second milieu que dans le premier, quand les rayons se rapprochent de la normale, c'est-à-dire quand le second milieu est le plus réfringent; et que la vitesse doit augmenter au moment de l'entrée dans le second milieu, quand il est le moins réfringent.

Angle limite. — Dans ce dernier cas, l'angle d'incidence peut être tel que l'ébranlement produit au point *b* par la surface de l'onde *bc* (*fig.* 1650), se soit propagé dans le second milieu, jusqu'à une distance plus grande que *ab*, quand la surface d'onde *bc* arrive en *a*. Alors il n'est plus possible de mener un plan tangent, du point *a* à la surface de l'onde sphérique produite par le point *b*, et la surface de l'onde réfractée n'existant pas, il n'y a plus de faisceau réfracté. Le dernier rayon réfracté sera couché sur la surface de séparation et correspondra au cas où l'ébranlement produit en *b* arrivera en *a* en même temps que la surface de l'onde incidente ; c'est-à-dire au cas où l'on aura $bd = ab$. Or, on a $bd = ab$. sin $r = ab$. n sin i, r étant ici plus grand que i (1947). On aura donc bd ou $ab = ab$. n sin i, d'où sin $i = 1 : n$, expression déjà trouvée pour le sinus de l'angle limite (1949).

Expérience du déplacement des franges. — Une expérience curieuse, de Fresnel et Arago, montre bien que, dans la théorie des ondulations, la vitesse de la lumiére est la plus petite dans le milieu le plus réfringent. Si, dans l'expérience des miroirs (2222), on place une lame transparente trés mince dans le trajet des rayons qui partent du point *s'* (*fig.* 1647), tout le système des franges est transporté du côté de la lame, et d'autant plus qu'elle est plus épaisse et plus réfringente. C'est que la frange centrale doit toujours correspondre à des distances *sa*, *s'a* contenant le même nombre de longueurs d'ondulation. Or, ces longueurs étant moindres dans la lame que dans l'air, la distance absolue de la frange centrale au point *s'* devra être plus petite que la distance au point *s*, pour que ces distances contiennent autant de ces longueurs.

Si la lame n'est pas extrêmement mince, les franges disparaissent comme si on interposait un écran opaque, ce qui tient à ce qu'elles sont alors transportées jusque dans l'espace où il ne parvient que des rayons réfléchis par un seul des miroirs. Car l'espace où se rencontrent les deux systémes d'ondes est évidemment limité par deux droites passant par les points *s*, *s'* et par le point I (*fig.* 1647). Ces droites représentent les derniers rayons réfléchis par les miroirs du côté de A*a*.

2234. Indice de réfraction relatif. — L'expérience prouve qu'un rayon qui traverse plusieurs lames à faces paralléles, émerge sans éprouver de déviation, et nous en avons conclu que l'*indice de réfraction relatif* entre deux

milieux est égal au rapport de leurs *indices absolus* (1966). La théorie va nous expliquer ces résultats. Considérons un rayon (*fig.* 1651) traversant de part en part deux lames juxta-posées terminées par des surfaces parallèles ; et soient v, v', v'' les vitesses de la lumière dans le vide et dans les deux lames, nous aurons

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}, \quad \frac{\sin r}{\sin r'} = \frac{v'}{v''}, \quad \frac{\sin r'}{\sin e} = \frac{v''}{v}.$$

Multipliant ces égalités terme à terme, il vient $\frac{\sin i}{\sin e} = 1$; et par conséquent $i = e$; le rayon émergent est donc parallèle au rayon incident. Si l'on divise la dernière égalité par la première, il vient $\frac{\sin r}{\sin r'} = \frac{v''}{v} : \frac{v'}{v} = \frac{n'}{n}$; n' et n étant les indices absolus des deux milieux.

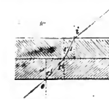


Fig. 1651.

2235. Puissance réfractive. — Pour savoir ce que représente la puissance réfractive $n^2 - 1$, dans le système des ondulations, appelons e et d, e' et d', l'élasticité et la densité de l'éther dans deux milieux contigus ; on aura, d'après la formule de Newton, $v^2 = e : d$, $v'^2 = e' : d'$; d'où $\frac{v^2}{v'^2} = n^2 = \frac{ed'}{e'd}$, et, par conséquent, $n^2 - 1 = \frac{ed' - e'd}{e'd}$. Divisant les deux termes par ee', il vient $n^2 - 1 = \left(\frac{d'}{e'} - \frac{d}{e}\right) : \frac{d}{e}$; ce qui montre que la puissance réfractive représente l'accroissement du rapport de la densité à l'élasticité de l'éther, quand on passe du vide dans un milieu, divisé par ce rapport dans le vide.

2236. APPLICATION DES INTERFÉRENCES A LA MESURE DES INDICES, ETC. — Le déplacement des franges dans l'expérience de Fresnel, a fourni à Arago un moyen très délicat de mesurer les indices de réfraction [1]. Une lame mince de la substance est placée sur le trajet des rayons réfléchis par l'un des miroirs. On observe de combien de rangs est déplacée la frange centrale, et pour cela, on interpose cette lame dans une partie seulement de la largeur du faisceau fourni par le trait lumineux, de manière à pouvoir comparer la partie déplacée des franges à celle qui ne l'est pas. Désignons par R le nombre de rangs qui correspond au déplacement, par e l'épaisseur de la lame, et par m et m' les nombres de longueur d'ondulation λ et λ' comprises dans l'épaisseur e, d'air et de la lame, nous aurons

$$[1] \qquad e = m\lambda = m'\lambda' ; \qquad \text{d'où} \qquad \frac{m'}{m} = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{v}{v'} = n.$$

[1] Œuvres de F. Arago, *Mémoires scientifiques*, t. I, p. 312.

Or, la frange du milieu s'étant déplacée de R rangs, on a, aussi, $m' = m + R$, chaque ondulation de plus dans la lame, déplaçant la frange du milieu d'un rang. On a donc

$$[2] \qquad n = \frac{m'}{m} = \frac{m+R}{m} = \frac{e+R\lambda}{e},$$

en remplaçant m par sa valeur tirée de [1]. Quand on connaîtra e et λ, on obtiendra ainsi, suivant l'expression de Laplace, l'indice de réfraction, au moyen de rayons qui n'auront pas été réfractés.

La formule [2] peut aussi servir à calculer λ, ou l'épaisseur e de la lame, quand son indice est connu, ainsi que e ou λ.

Arago et Fresnel ont appliqué cette méthode, vers 1818, à la comparaison de l'indice de l'air sec, à celui de l'air humide. Deux tubes de cuivre de 1 mètre de longueur, fermés par des glaces à faces bien parallèles, étaient placés sur le chemin des deux faisceaux qui devaient interférer ; l'un était rempli d'air sec, et l'autre, d'air saturé d'humidité. Le déplacement était d'une bande et un quart du côté du tube sec, ce qui indique que la vapeur est moins réfringente que l'air. Mais la différence est très petite, car un excès de pression de 1 millimètre sur 50, dans un des tubes, tous les deux étant remplis d'air sec, produit le même déplacement. Des expériences faites avec des tubes de quelques centimètres seulement de longueur, n'ayant pas donné de déplacement, celui qu'on observait dans les longs tubes ne pouvait être attribué à un dépôt de vapeur sur les glaces.

Arago, aidé de M. Laugier, a cherché si la vapeur précipitée dans l'air, en modifiait la réfraction. Les expériences furent faites en plein air, par un temps de brouillard; les rayons lumineux d'une lampe traversaient, les uns l'atmosphère brumeuse, les autres un tube rempli d'air sec, dont les glaces se prolongeaient de manière à être traversées par les deux faisceaux. Les franges se déplacèrent de trois ou quatre bandes, et toujours du côté opposé au tube. Le brouillard *augmente* donc un peu la réfraction de l'air; résultat singulier, car il est inverse de ce qu'il eût été pour des rayons traversant l'air simplement humide, et l'augmentation est trop faible pour qu'on puisse l'attribuer aux rayons qui auraient traversé les globules d'eau. L'augmentation produite par la vapeur précipitée est, du reste, extrêmement petite ; aussi, les astres ne paraissent-ils pas changer de position quand des brouillards ou des nuages passent devant eux.

2237. Réfracteur interférentiel d'Arago. — Arago a fait construire en 1854, par MM. Soleil et Dubosc, un appareil nommé *réfracteur* ou *réfractomètre interférentiel*, destiné à faire les expériences analogues à celles qui précédent. La lumière d'une lampe passe par une fente verticale placée au foyer principal d'une lentille convergente, qui donne un faisceau de rayons parallèles. Chacun des deux tubes, disposés horizontalement l'un à côté de l'autre, est traversé par une partie de ce faisceau. Une pompe pneumatique sert à

aspirer l'air de l'un d'eux, que d'autre air saturé d'humidité vient remplir. Les rayons, à leur sortie des tubes, passent par deux fentes verticales rapprochées, comme dans l'expérience d'Young (2221), de manière à produire des franges, que l'on observe au moyen d'une lunette à réticule. On fait en sorte que le milieu de la frange centrale coïncide avec le fil vertical de la lunette, quand les deux tubes contiennent de l'air au même état. Au lieu d'observer le déplacement des franges, on interpose dans les faisceaux sortant des prismes, des lames de verre dites *compensateurs*, que l'on incline plus ou moins autour d'un axe vertical, de manière à faire varier l'épaisseur de verre traversée par les rayons, et à ramener la frange du milieu sur le fil du réticule. Des expériences préalables font connaître à combien de rangs correspond un mouvement angulaire de chaque lame. Un cercle horizontal gradué, ayant son centre sur l'axe de rotation des lames, permet de mesurer l'angle qu'elles font avec l'axe des tubes.

Application à l'indice des gaz. — M. Jamin a appliqué la méthode précédente à la mesure de l'indice de réfraction des gaz [1]. Il a commencé par modifier l'appareil d'Arago, dans lequel la juxta-position des tubes empêche de les porter à des températures différentes, et rend le jeu du compensateur trés difficile. M. Billet a trouvé moyen de séparer les tubes, mais la disposition imaginée par M. Jamin permet, en outre, d'écarter les franges à volonté. Voici comment est disposé l'appareil : un faisceau divergent, émanant d'une fente verticale vivement éclairée, est partagé par un écran étroit paralléle à la fente, en deux faisceaux d'autant plus écartés l'un de l'autre, que l'écran est plus large. Chacun de ces faisceaux traverse les lames opposées d'un compensateur, puis les deux tubes, et vient rencontrer un miroir sphérique concave un peu incliné par rapport à l'axe de l'appareil. Ce miroir réfléchit les deux faisceaux et les réunit en un foyer semblable à la fente, en leur conservant la différence de marche qu'ils ont pu éprouver en traversant les tubes. Les deux faisceaux se séparent de nouveau au-delà du trait focal, et sont reçus par les miroirs de Fresnel placés à côté des tubes, le trait focal remplaçant la source lumineuse de l'expérience ordinaire. En faisant varier l'angle des miroirs, on modifie à volonté la largeur des franges. Quand les deux tubes contiennent des gaz identiques, on met le fil de la loupe micrométrique sur la frange centrale, et quand les gaz sont différents, on ramène cette frange sur le fil, au moyen du compensateur, dont la graduation fait connaître le déplacement correspondant des franges. Une formule permet ensuite de conclure de ce déplacement le retard des deux faisceaux, et par suite l'indice relatif des gaz contenus dans les tubes.

M. Jamin a mesuré avec cet appareil les indices de l'air et des divers gaz, et il a trouvé sensiblement les mêmes nombres qu'avaient trouvés Biot et Arago, et Dulong (2018). L'appareil précédent ne semble donc pas capable de donner

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIX, p. 382.

des résultats beaucoup plus précis que le prisme de Borda. La méthode qui suit est, au contraire, tellement délicate, qu'elle permet d'observer des effets qu'on n'aurait jamais crus susceptibles d'être appréciés.

2238. Réfracteur interférentiel de M. Jamin [1]. — La *fig.* 1652 représente l'ensemble de cet appareil. A'A, B'B sont deux tubes en zinc de 4 mètres de longueur, fermés par des glaces, et destinés à contenir les gaz que l'on veut comparer. Un faisceau de rayons partant d'une lampe, et rendu cylindrique par une lentille, est reçu par une glace à faces bien parallèles *m*, de 30 à 40mm d'épaisseur, de manière que chaque rayon se partage en deux : l'un, réfléchi par la première surface, traverse le tube A'A ; l'autre, réfléchi par la seconde, traverse le tube B'B. Ces deux rayons sont reçus à leur sortie, sur une seconde glace *n* identique avec la première. Là, chacun des rayons se

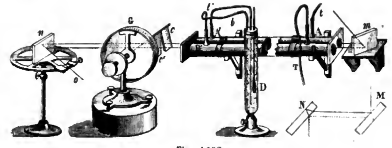


Fig. 1652.

partage en deux, une partie se réfléchissant à la première surface, et l'autre à la seconde. Parmi les quatre rayons réfléchis, il y en a deux qui se superposent, comme on le voit à part en MN. Si les plaques sont exactement parallèles, et les tubes AA', BB' remplis du même gaz, les rayons superposés ont parcouru les mêmes épaisseurs de gaz, d'air et de verre, et, par conséquent, leurs intensités s'ajoutent. Mais si l'on incline peu à peu la glace N, le rayon réfléchi à sa seconde surface parcourt dans son épaisseur, plus ou moins de chemin que le rayon qui s'est réfléchi dans l'intérieur de la glace M ; ces rayons prennent des différences de marche, et il se forme des franges d'autant plus larges, que les glaces sont plus près du parallélisme.

Ces franges sont observées à travers une lunette à réticule, et le milieu de l'une d'elles coïncidant avec le fil vertical, on le ramène à la coïncidence, au moyen d'un *compensateur*, quand elle a été déplacée par l'interposition de milieux différents sur le trajet des deux rayons. Le compensateur Gcc', consiste en deux lames de verre un peu inclinées l'une par rapport à l'autre, et fixées à l'axe d'un goniomètre de Wollaston G. Si les deux lames sont également inclinées sur les deux rayons, elles ne modifient pas les franges ; mais

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LII, p. 163 et 171.

si l'on fait tourner l'axe qui les porte, les espaces parcourus par les rayons dans ces lames, sont inégaux, et les franges se déplacent. Plus l'angle des lames est petit, plus il faut les faire tourner pour obtenir le même déplacement de franges. Pour conclure de la rotation des lames, le déplacement qu'elles ont compensé, M. Jamin a construit une courbe dont les abcisses représentent les angles de rotation, et les ordonnées, les nombres de rangs dont les franges sont déplacées. Cette courbe, très régulière, diffère peu d'une ligne droite. Dans chaque expérience, le compensateur étant d'abord sans action, on le faisait tourner de manière à ramener sous le fil de la lunette la frange qui s'y trouvait quand les tubes étaient remplis du même fluide, et l'on déduisait de l'angle de rotation, au moyen de la courbe, le nombre de rangs dont cette frange avait été déplacée.

2239. Indice de la vapeur d'eau. — M. Jamin a appliqué cet appareil à la mesure de l'indice de réfraction de la vapeur d'eau. Pour remplir le tube A'A d'air sec, et le tube B'B d'air humide, de l'air était aspiré par l'extrémité B du tube B'B, au moyen d'un vase aspirateur ajusté en BT. Cet air entrait en *t*, après avoir parcouru un appareil à dessiccation, traversait le tube AA', sortait en A', et pénétrait au fond d'une éprouvette D remplie de pierre ponce mouillée, soit avec de l'eau pure, soit avec des mélanges titrés d'eau et d'acide sulfurique destinés à donner à l'air un état hygrométrique déterminé (II, 1161). Cet air humide arrivait par le tuyau *b*B', dans le tube B'B, et passait dans le vase aspirateur adapté en T. Après avoir attendu que les franges fussent bien fixes, on arrêtait le courant de gaz, et on les ramenait à leur position primitive, au moyen du compensateur. On répétait ensuite l'expérience, en faisant passer le gaz en sens inverse, de manière que les franges étaient déplacées du côté opposé, puis on faisait une nouvelle expérience en faisant passer le gaz comme la première fois, et ainsi de suite. Les rotations qu'il fallait imprimer au goniomètre n'étaient pas égales dans les différents cas, mais elles allaient en croissant assez régulièrement, ce qui tenait aux modifications qu'éprouvaient les gaz ou les diverses parties de l'appareil, sous l'influence des plus faibles variations de température, dues en partie à la présence de l'expérimentateur. En représentant par a, b, a', b'.... les rotations successives du compensateur alternativement dans un sens et dans l'autre, on prenait pour ces rotations, la moyenne entre b et $\frac{1}{2}(a+a')$, en appliquant la méthode des alternatives de Coulomb (III, 1301); puis la courbe donnait le déplacement correspondant des franges. Ce déplacement se faisait toujours du côté de l'air sec ; ce qui indique que l'humidité diminue le pouvoir réfringent.

Il reste à conclure des expériences, l'indice de réfraction de la vapeur seule. Si N est l'indice de l'air humide sous la pression H et à la température $t°$, x celui de la vapeur sous la tension f qu'elle possède dans le mélange, et enfin n l'indice de l'air sec sous la pression $H-f$, on aura (2018)

$$N^2-1=(x^2-1)+(n^2-1). \qquad [2]$$

N^2-1 se déduira de l'expérience, en partant de la formule (2236) $\frac{u}{V}=\frac{e+R\lambda}{e}$, dans laquelle u est la vitesse de la lumière dans l'air sec sous la pression H, V cette vitesse dans l'air humide, et e la longueur des tubes. Cette formule donne

$$\frac{e}{V}-\frac{e}{U}=\frac{R\lambda}{u}, \quad \text{ou} \quad \frac{ev}{V}-\frac{ev}{u}=\frac{R\lambda v}{u}, \quad \text{ou} \quad eN-en'=R\lambda n',$$

v désignant la vitesse dans le vide, et n' l'indice de l'air sec à la pression H. On tire de là $N^2-1=n'^2\left(1+\frac{2R\lambda}{e}\right)-1$, en négligeant le terme $R^2\lambda^2$. Egalant cette valeur de N^2-1 à celle de l'équation [1], il vient

$$x^2-1+n^2-1=n'^2-1+\frac{2R\lambda}{e}n'^2,$$

formule qui servira à calculer l'indice x de la vapeur sous la pression f et à la température t, quand on connaîtra les indices n et n' de l'air sec aux pressions $H-f$ et H.

Ces indices peuvent se calculer au moyen de celui de l'air, $\nu=1{,}000589$, trouvé par Dulong (2018) pour la température 0° et la pression de 760mm; car on a (2017) $\frac{n^2-1}{d}=\frac{n'^2-1}{d'}=\frac{\nu^2-1}{\delta}$, d, d', δ étant les densités de l'air à $t°$ sous les pressions $H-f$, H et 760mm. Les deux premières, exprimées en fonction de δ, sont $d=\frac{\delta(H-f)}{1+at}$, et $d'=\frac{\delta H}{1+at}$, en désignant par a le coefficient de dilatation de l'air.

Quand on aura l'indice de la vapeur à la température $t°$ et à la pression f, on pourra en déduire sa valeur x' à une autre pression et à une autre température, en appliquant la formule $\frac{x^2-1}{D}=\frac{x'^2-1}{D'}$, qui peut être regardée comme vraie entre des limites suffisamment rapprochées. Les densités D et D' sont données par la formule $D=\frac{0{,}81\,f}{(1+at)\,760}$, dans laquelle 0,81 est la densité de la vapeur par rapport à l'air à la pression de 760mm et à la température de 0°. Si l'on suppose $f=760^{mm}$ et $t=0°$, on aura une valeur de x' qui représentera l'indice de la vapeur dans des conditions où elle ne peut exister; mais cette valeur ficfive, une fois calculée, fournira une constante qui, égalée à $(x^2-1):D$ servira à déterminer x dans les conditions correspondantes à la valeur de D. — Nous avons fait connaître plus haut (2019) les résultats trouvés par M. Jamin.

2240. Indice de réfraction de l'eau comprimée. — M. Jamin a appli-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LII, p. 163.

qué la même méthode à l'étude de la réfraction de l'eau comprimée [1]. Ce liquide était contenu dans deux tubes de 1 mètre de longueur, fermés par une même glace et plongés dans une auge terminée elle-même par deux glaces parallèles, et remplie d'eau. Dans l'un des tubes, l'eau n'avait à supporter que la pression atmosphérique ; dans l'autre, elle était soumise à la pression d'une colonne de mercure. Pour cela, le tube était mis en communication avec la branche fermée d'un manomètre à air libre et à deux branches, disposé comme celui de la *figure* 641 (II,866), seulement il y avait au haut de la branche fermée, un robinet à entonnoir destiné à la remplir complètement d'eau. Le déplacement des franges donnait l'indice de réfraction relatif, $n' : n$, de l'eau à la pression de 76^{cm}, et de l'eau sous la pression $76^{cm}+P$, au moyen de la formule

$$\frac{n'}{n} = \frac{e+R\lambda}{e}, \quad \text{qui donne} \quad n'^2-1=n^2-1+\frac{2R\lambda}{e}n, \qquad [2]$$

en négligeant le terme qui contient λ^2.

Cette méthode est tellement délicate qu'une augmentation de pression de 1 millimètre de mercure, suffit pour déplacer les franges. De plus, la chaleur dégagée par la compression devient sensible ; car les franges sont déformées par les mouvements de l'eau, et il faut attendre 10 minutes environ pour qu'elles reprennent leur régularité. Or, nous avons vu qu'on n'a pu, avec les thermoscopes les plus sensibles, saisir le moindre échauffement dans l'eau soumise aux compressions les plus énergiques (II,1039).

On pourrait craindre, dans ces expériences, l'influence de l'allongement du tube à eau comprimée ; mais, ce tube étant plongé dans l'eau, cet allongement n'a pour effet que de remplacer une tranche d'eau très mince par une tranche égale d'eau comprimée, ce qui ne peut avoir d'influence sensible.

Compressibilité de l'eau. — M. Jamin a reconnu que le pouvoir réfringent de l'eau à diverses pressions, est constant ; c'est-à-dire qu'on a $(n'^2-1) : d' = (n^2-1) : d$; d' et d étant les densités de l'eau à deux pressions différentes. En effet, en appelant k le coefficient de compressibilité de l'eau pour une pression de 1^{mm} de mercure, on a $d' = d\ (1+kP)$. Substituant dans la formule qui précède, on en tire $n'^2-1 = (n^2-1)+kP\,(n^2-1)$. Egalant cette valeur de n'^2-1 à celle que donne la formule [2], on trouve

$$kP\,(n^2-1) = \frac{2R\lambda}{e}\,; \qquad \text{d'où} \qquad k = \frac{R}{P}\,\frac{2\lambda n}{e\,(n^2-1)}.$$

Pour une pression de 760^{mm}, on aura $K = k \times 760$. L'expérience a donné, pour l'eau ordinaire, $k = R : P = 0{,}0348$; d'où $K = 0{,}0000500$; et pour l'eau privée d'air, $R : P = 0{,}0356$; d'où $K = 0{,}0000511$. Or, M. Grassi a trouvé, pour le coefficient de compressibilité de l'eau à 0° (I, 294), le nombre 0,0000503, qui diffère à peine de ceux qui précèdent. On en peut donc conclure que le pouvoir réfringent de l'eau, pour des accroissements de pression

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LII, p. 163.

qui sont allés jusqu'à 792mm, est constant. S'il en était ainsi pour les autres liquides, on aurait un moyen très précis de mesurer leur compressibilité, sans avoir à tenir compte de la variation de volume des vases.

2241. Influence du mouvement d'un milieu sur l'éther qu'il contient. — M. Fizeau est parvenu à résoudre, au moyen d'un réfracteur interférentiel particulier, une question très importante relative à la manière dont l'éther est uni aux molécules pondérables des corps. Quand ces derniers se déplacent, l'éther qu'ils contiennent est-il emporté avec eux ? Ou bien le corps ne fait-il que traverser l'éther de l'espace, comme le filet du pêcheur traverse l'eau ? Ou bien enfin, une partie de l'éther suit-elle seule le corps ? Arago avait essayé de résoudre la question en cherchant, au moyen d'un prisme, si la déviation minimum des rayons d'une étoile placée dans l'écliptique sur la tangente à l'élément occupé par la terre, restait la même à 6 mois de distance ; c'est-à-dire quand la terre marche vers l'étoile, ou s'en éloigne, avec une vitesse de 8 lieues par seconde. Dans le premier cas, si l'éther était adhérent aux molécules du prisme, les choses se passeraient comme si les ondulations étaient raccourcies dans le rapport de 77000 — 8 à 77000, et dans le second, comme si elles étaient augmentées dans celui de 77000 + 8 à 77000. Mais on ne put constater aucune différence. Fresnel avait conclu de là que le corps n'emporte que la portion d'éther qu'il condense autour de ses molécules, et qui forme l'excès de la densité de l'éther dans son intérieur sur celle de l'éther environnant. Les expériences de M. Fizeau l'ont conduit précisément à ce résultat [1].

Ces expériences ont été faites sur l'eau en mouvement. La *figure* 1653 représente la disposition de l'appareil. oO, $O'm$ sont deux lunettes opposées, comme dans l'expérience de Suresne (1743), mais placées à 3 mètres seulement l'une de l'autre. En l est une lentille cylindrique verticale, qui rassemble les rayons solaires en une ligne focale s servant de source lumineuse. Les rayons sont réfléchis par une glace, n, inclinée de 45°, et semblent venir du point s', symétrique du point s. Ces rayons, rendus parallèles par l'objectif O, sont divisés en deux faisceaux par deux fentes pratiquées dans un écran e, traversent les deux tubes AA', BB', fermés à leurs extrémités par une même glace, et dans lesquels de l'eau circule en sens contraire. Les faisceaux sont ensuite réunis, par l'objectif O', sur un miroir plan m placé à son foyer, et réfléchis de manière à changer de place ; celui qui passait par le tube AA' passant par BB', et *vice versâ*, comme l'indiquent les flèches, qui sont en ligne ponctuée pour l'un des faisceaux. Ces faisceaux traversent de nouveau l'objectif O et vont faire en s' une image focale que l'on observe avec un oculaire o muni d'un réticule. Si les tubes AA', BB' contiennent un fluide en repos, les deux pinceaux forment en s' des franges d'interférence. Pour que ces franges ne soient pas trop serrées, il faut que l'angle s' soit très petit. Pour remplir

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVII, p. 385.

cette condition, tout en séparant les tubes AA', BB' par une distance convenable, on dispose obliquement en *vv'* deux glaces épaisses qui écartent latéralement les rayons sans les dévier.

Voici maintenant comment on fait passer le courant d'eau en sens contraire dans les deux tubes AA', BB'. Quatre flacons à trois tubulures, dont une est bouchée et ne sert que pour y verser de l'eau, sont disposés en *f*, *f'*, *f''*, *f'''*. La tubulure centrale met l'eau qu'ils contiennent en communication avec les extrémités des tubes AA', BB', au moyen des tuyaux *c*, *c'*, *c''*, *c'''*, qui plongent jusqu'au fond des flacons. Le tube *tt* fait communiquer les parties supérieures, contenant de l'air, des flacons *f* et *f''* ; et le tube *t't'*, les parties supérieures des flacons *f'*, *f'''*. Ces tubes peuvent être mis en relation avec un récipient *rr'* plein d'air comprimé, par les tubes de plomb *p*, *p'* munis de robinets *r*, *r'*. Ces

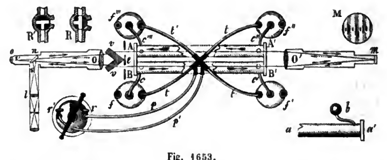


Fig. 1653.

robinets sont à trois voies, comme on le voit en R, R', de manière qu'on peut faire communiquer les tubes *p* ou *p'*, et par conséquent les flacons *f'*, *f''* ou *f'*, *f'''*, soit avec l'air comprimé, soit avec l'atmosphère. — Supposons que le tuyau *p* communique avec l'air comprimé, et le tube *p'*, avec l'atmosphère ; l'eau des flacons *f* et *f''* sera refoulée par l'air comprimé, à travers les tuyaux *c*, *c''* et les tubes B'B, AA', et se précipitera dans les flacons *f'*, *f'''*, où règne la pression atmosphérique. En tournant de 90° les robinets *r*, *r'*, on fait ensuite passer l'eau en sens contraire. On a pu ainsi, avec une pression de 2 atmosphères en sus de la pression extérieure, obtenir une vitesse de 7 mètres par seconde environ.

Cela posé, tant que l'eau est en repos dans les deux tubes, les franges restent fixes, même si l'on interpose dans un des faisceaux une lame transparente, ou même si l'on change le fluide contenu dans un des tubes ; car les deux faisceaux traversent toujours les mêmes milieux. Mais dès que l'eau se meut en sens contraire dans les deux tubes, l'un des faisceaux marche dans le sens du courant, en allant comme en revenant, tandis que l'autre marche en sens contraire ; et l'on voit les franges se déplacer d'une quantité sensiblement proportionnelle à la vitesse de l'eau. Quand on change le sens du courant, le

déplacement se fait du côté opposé. Supposons que l'eau circule dans le sens des flèches empennées (*fig.* 1653), le faisceau lumineux qui entre en A marchera contre le courant dans les tubes AA' et BB'; et si l'éther est entraîné par l'eau, les ondes suivront le mouvement, et se trouveront en avance, en *s'*, sur celles de l'autre pinceau, qui, au contraire, sont retardées par le transport de l'éther en sens opposé. La déviation devra donc se faire du côté du tube AA'; l'espace parcouru par le premier faisceau devant être plus long que celui que parcourt le second, pour qu'il y ait le même nombre d'ondulations. C'est, en effet, ce qui a lieu.

Pour mesurer le déplacement des franges, M. Fizeau disposait en *s'*, un micromètre tracé sur verre, représenté à part en M, aux divisions duquel il rapportait la position des franges. Avec la vitesse de 7 mètres par seconde, ce déplacement fut de $\frac{1}{4}$ de frange environ dans les deux sens. Le calcul indique que le déplacement aurait été double si tout l'éther de l'eau eût été entraîné avec le liquide; d'où l'on doit conclure que tout l'éther ne participe pas au mouvement de l'eau. Si l'on admet, en principe, avec Fresnel, que la vitesse de propagation, au lieu d'être augmentée de toute celle de l'eau, n'est augmentée que de la vitesse du centre de gravité de la masse d'éther qui y est contenue et qui ne se déplace qu'en partie, on trouve un résultat sensiblement égal à celui que donne l'expérience; ce qui rend très vraisemblable le principe de Fresnel.

Des expériences faites au moyen d'un courant d'air lancé par un soufflet avec une vitesse de 25^{m} par seconde, n'ont donné aucun déplacement des franges. D'après le principe de Fresnel, le déplacement ne devait être que de $\frac{2}{10000}$ de la largeur d'une frange, quantité tout-à-fait insensible.

2242. Scintillation. — Arago s'est servi du principe des interférences pour expliquer la *scintillation* des étoiles, qui consiste en variations fréquentes dans leur éclat et leurs dimensions apparentes, accompagnées, pour les plus brillantes, de changements de couleurs. La scintillation n'a lieu que pour les corps lumineux dont le diamètre apparent est insensible; elle s'observe dans l'image très étroite du soleil produite sur une très petite sphère; et les planètes, surtout les plus petites, en présentent quelquefois des traces, mais sans coloration. La scintillation est très vive dans une lunette. Si l'on imprime de petites secousses à l'instrument, comme le faisait Nickolson, on aperçoit un ruban brillant présentant souvent plusieurs couleurs au même moment en divers points. Le phénomène est des plus remarquables avec *antharès* du scorpion. Si l'on enfonce l'oculaire, on distingue, dans l'image trouble et dilatée de l'étoile, une agitation vive et des changements de couleurs. L'état de l'atmosphère a une influence évidente sur le phénomène ; il est plus marqué, près de l'horizon qu'au zénith, quand le temps change, quand il fait du vent. La scintillation est au contraire très faible, et même nulle pour certaines étoiles de première grandeur, par un temps sec et chaud, sous le ciel pur des tropiques, etc.

On a fait trois hypothèses principales sur la cause de la scintillation. Aristote, Cardan... l'expliquaient par les vacillations de l'œil, qui manquerait de fermeté pour regarder à des distances immenses. Tycho, Kepler, Galilée..., admettaient des variations réelles dans l'éclat de l'étoile. La scintillation devrait, dans ces deux hypothèses, être indépendante de l'état de l'air. Alhazen, Huyghens, Newton, Saussure...., voyaient dans la scintillation le résultat du déplacement des rayons produits par l'agitation de l'air. Mais, ces déplacements, amplifiés dans une lunette, devraient faire voir un ruban lumineux. Voici comment Arago explique le phénomène.

L'image d'une étoile formée sur la rétine est le point de concours de tous les rayons parallèles qui entrent par la pupille. Les ondulations de ces rayons sont d'accord entre elles quand ils ont traversé des milieux identiques. Mais si ces rayons, quoique très rapprochés, rencontrent, dans le long trajet qu'ils parcourent dans l'atmosphère, des portions d'air inégalement échauffées, inégalement humides, ils pourront inférer, totalement ou en partie, et l'interférence n'ayant pas lieu avec les mêmes différences de marche pour les divers rayons colorés, certains d'entre eux seront éteints, de sorte que l'étoile paraîtra colorée. Comme l'état de l'atmosphère change d'un instant à l'autre en quelques points du trajet des rayons, surtout s'il fait du vent, on comprend que l'éclat et la couleur de l'image changeront continuellement. On conçoit qu'avec une lunette, dont l'objectif reçoit un bien plus grand nombre de rayons, le phénomène devra être plus prononcé. Si les astres qui ont un diamètre apparent sensible ne scintillent pas, c'est que chaque point produit une image qui forme sur la rétine un cercle de dissipation ; les cercles voisins se superposent, de manière que les couleurs se mêlant, et les variations d'intensité se compensant, l'image reste calme et incolore, excepté aux bords, où, en effet, l'on remarque souvent de légères ondulations.

La théorie d'Arago n'est pas à l'abri d'objections sérieuses ; elle n'a pas été admise par tous les physiciens. MM. Messotti et Donati expliquent la scintillation, par des inégalités dans la réfraction et la dispersion aux surfaces de séparation de masses d'air de densités différentes, sans cesse en mouvement, et M. Montigny, par des réflexions totales à ces surfaces, réflexions qui ont lieu sous des incidences différentes pour les divers rayons colorés (2027, 3°).

Scintillomètres. — Pour apprécier l'intensité de la scintillation, il faudrait pouvoir compter les espèces de pulsations qui se distinguent dans l'image épanouie de l'étoile vue dans une lunette dont l'oculaire est trop enfoncé. Arago a indiqué le moyen suivant : Quand on réduit l'ouverture de l'objectif d'une lunette, au moyen d'un diaphragme, puis qu'on enfonce peu à peu l'oculaire, qui d'abord était mis au point, on ne tarde pas à apercevoir au milieu de l'image dilatée de l'étoile, une tache noire, au centre de laquelle apparaît ensuite un point brillant, et ainsi de suite. Si l'on arrête l'oculaire au moment où commence à apparaître la tache noire, on remarque que, par l'effet de la scintillation, cette tache disparaît et reparaît alternativement ; et il n'y a qu'à compter le

nombre de disparitions pendant un temps donné, pour juger de l'activité de la scintillation. Par exemple, l'étoile *sirius* a donné en 5 minutes, 40, 23, 28, 30 disparitions de la tache noire, à différentes époques. Une lunette ainsi disposée constitue donc un véritable *scintillomètre*.

MM. Liandier, de Portal, Poey, ont tiré parti du scintillomètre pour prédire le temps qu'il fera le lendemain. Il résulte de leurs observations que, lorsqu'on observe le disque étalé d'une étoile de première grandeur assez élevée au-dessus de l'horizon, on y distingue des espèces d'ondulations allant d'un bord à l'autre du disque, indiquant la direction du vent qui règne dans les régions supérieures de l'atmosphère, sens qui est lié avec la hauteur du baromètre et permet de prédire le temps probable qu'il fera le lendemain ou le surlendemain [1].

III. Décomposition de la lumière, action sur les corps, etc.

2243. Dispersion. — Les diverses couleurs correspondant à des vibrations de rapidité différente, et la déviation des rayons dans la réfraction, dépendant du changement de vitesse de la lumière quand elle passe d'un milieu dans un autre, il faut admettre, pour expliquer la *dispersion*, que ce changement est différent pour les divers rayons colorés, c'est-à-dire que les ondes de longueurs différentes se propagent dans les milieux réfringents, avec des vitesses différentes. Cette conséquence a d'abord embarrassé les physiciens, et elle a constitué longtemps une des plus graves objections que l'on ait faites au système des ondulations. Elle est, en effet, en contradiction avec la formule de Newton $v^2 = e : d$.

Pour lever la difficulté, on a d'abord considéré que cette formule suppose que l'amplitude des vibrations est insensible par rapport à la longueur d'ondulation, et qu'il peut bien n'en être pas ainsi des vibrations lumineuses, les longueurs d'ondulation de l'éther étant extrêmement petites. Fresnel avait déduit de là que les ondulations les plus courtes devaient se propager le plus lentement. Mais la véritable explication découle de la constitution même des milieux réfringents. Si, en effet, la vitesse de la lumière dans l'éther du vide est la même pour toutes les couleurs, comme semblent l'indiquer les résultats négatifs auxquels ont conduit les tentatives faites pour prouver le contraire (1879), il n'en est pas de même dans un corps transparent, qui retient l'éther emprisonné entre ses molécules. Les ondulations doivent alors tourner autour de ces molécules, et l'on conçoit que les retards qu'elles éprouvent dans leur propagation, soient plus grands pour les plus courtes que pour les plus longues. Au reste, la question a été tranchée par les recherches analytiques de Cauchy : l'inégalité de vitesse de propagation des ondes de différentes longueurs, à

[1] Cosmos, *Revue des progrès des sciences*, t. XIX, p. 20, 263, 265.

travers l'éther renfermé dans un système de molécules pondérables, a été rattachée, dans ces savants calculs, aux lois de la mécanique rationnelle ; de sorte que cette inégalité est aujourd'hui démontrée indépendamment du fait de la dispersion, fait qui se trouve ainsi être une conséquence du calcul mathématique.

2244. Décomposition de la lumière par absorption. — On conçoit que la présence des molécules pondérables gêne les vibrations de l'éther et en diminue l'amplitude, ce qui explique l'affaiblissement de la lumière par les milieux qu'elle traverse, affaiblissement qui dépend de leur épaisseur et de leur nature. Les corps très denses, comme les métaux, anéantissent complètement les vibrations quand leur épaisseur n'est pas excessivement mince. — L'analyse démontre que, dans un même milieu, certaines ondulations pourront être anéanties plus facilement que d'autres, suivant leur longueur et l'arrangement des molécules du milieu réfringent : de là la décomposition de la lumière par transmission, et les divers effets du polychroïsme (2047). Nous avons vu que les vapeurs métalliques contenues dans les flammes, leur communiquent la faculté d'absorber principalement les rayons qu'elles émettent en grande quantité (2042). M. Stokes explique ce résultat, en comparant le milieu gazeux à un espace encombré de cordes tendues, espace dans lequel les vibrations qui rencontrent des cordes susceptibles d'en prendre l'unisson, sont éteintes en mettant ces cordes en mouvement ; sans cela il y aurait création de force vive.

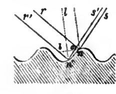


Fig. 1654.

2245. Couleur des corps. — Rappelons d'abord que la lumière ne se décompose par réflexion que sur les surfaces dépolies, c'est-à-dire couvertes d'aspérités très fines et très rapprochées. Voici comment Fresnel explique, en partant de là, la couleur des rayons réfléchis : si nous considérons deux rayons incidents voisins, l'un sn (*fig.* 1654), aboutissant au sommet d'une aspérité, l'autre, $s'n'$, en un point d'une des cavités qui les séparent, et tels que les normales en n et n' soient *parallèles*, les rayons réfléchis nr, $n'r'$ seront aussi parallèles, et le rayon $s'n'$ sera, après la réflexion, en retard sur le rayon sn, de la quantité $an'b$, ab étant une perpendiculaire aux normales. Or, en appelant e la profondeur de la cavité, comptée parallèlement à ces normales, et i l'angle $s'n'l$, on aura $an' + n'b = 2e : \sin i$. Si la profondeur e est telle que le retard soit égal à une demi-longueur d'ondulation des rayons violets, ces derniers seront détruits par interférence, et la lumière réfléchie sera colorée. Si le retard est différent, on conçoit que certaines couleurs seront détruites en partie et en proportion différente, de sorte que la lumière réfléchie présentera une nuance qui changera avec la valeur de e. Pour vérifier ce résultat, il faudrait pouvoir faire varier e à volonté, ce qui serait très difficile. Mais on peut agir autrement, et modifier la différence $an'b$, en faisant varier l'angle $s'n'l = i$. Pour cela, on prend un miroir simplement douci à l'éméri fin,

et l'on regarde par réflexion un corps blanc. Quand l'obliquité des rayons est assez grande pour que l'on aperçoive l'image de ce corps, il paraît d'une couleur orangée, quelle que soit la nature de la surface réfléchissante ; et quand on augmente l'inclinaison, la teinte s'éclaircit et finit par paraître blanche.

2246. Effets chimiques des divers rayons colorés. — On conçoit que l'agitation provoquée dans l'éther qui enveloppe les molécules, ou dans ces molécules elles-mêmes, par les vibrations des rayons incidents, provoque l'association ou la séparation des molécules d'espèces différentes, et détermine des combinaisons ou des décompositions chimiques. Mais, ici, le phénomène est moins facile à saisir. Cependant on peut entrevoir que les molécules agitées seront amenées à des positions régulières en obéissant aux forces qui les sollicitent, comme celles de l'eau au-dessous de zéro quand on la fait vibrer, ou les parcelles de fer qui forment le spectre magnétique, quand on imprime de petites secousses à la feuille de carton sur laquelle on les a répandues.

On remarque que les divers rayons colorés présentent une activité chimique différente qui change avec la nature des substances (2065). On conçoit, en effet, que certaines molécules doivent répondre plus facilement que d'autres à certaines vibrations, suivant leur rapidité, comme les cordes d'une harpe, dont quelques-unes seulement répondent aux sons produits à proximité. Cette comparaison nous permet d'expliquer comment certaines couches sensibles peuvent conserver la couleur des rayons lumineux qui les ont frappées ; il semble que les molécules de la surface ont été amenées à un état d'arrangement qui leur permet de vibrer à l'unisson des vibrations qui ont produit la décomposition ; de même que les molécules de tiges de verre, de disques de soufre, d'abord rebelles aux vibrations, finissent, sous l'influence de celle-ci, par s'arranger de manière que les sons sortent ensuite avec la plus grande facilité. Rappelons aussi les remarquables résultats obtenus par M. Niepce de Saint-Victor : les chlorures qui donnent à la flamme de l'alcool certaines couleurs, c'est-à-dire, occasionnent dans l'éther, pendant la combustion, des vibrations d'une certaine rapidité, donnent aussi aux couches sensibles la faculté de *réfléchir* plus facilement les rayons de cette couleur, quand elles en ont été frappées pendant quelque temps (2078). Ces substances semblent se comporter comme des cordes tendues qui répondent facilement aux sons qu'elles sont susceptibles elles-mêmes d'engendrer.

2247. Phosphorescence. — L'action des rayons lumineux pour produire la phosphorescence se conçoit facilement : les vibrations de l'éther se communiquant à celui qui entoure les molécules superficielles des corps phosphorescents, lequel continue à vibrer pendant quelque temps, comme une corde tendue qui résonne encore après que le son qui l'a excitée cesse de se faire entendre. Il y a des corps qui ne restent phosphorescents que pendant un temps très court ; d'autres qui ne paraissent pas le devenir, même avec l'aide du *phosphoroscope* ; de même qu'il y a des corps très denses qui ne conservent que pendant un temps imperceptible, les vibrations communiquées, et d'autres

qui ne paraissent pas susceptibles de vibrer par communication. — Nous avons vu que la lumière phosphorescente est ordinairement moins réfrangible que celle qui l'a excitée. Pour expliquer ce phénomène, très marqué surtout quand il s'agit de la *fluorescence* (2087), M. Eisenlohr suppose que les rayons obscurs de différentes longueurs d'ondulation, interfèrent de manière à donner des vibrations résultantes plus lentes, comme dans l'expérience de Tartini pour le son (I,559).

2248. Des moyens d'engendrer la lumière. — C'est principalement au moyen des *actions chimiques* que nous produisons la lumière. Il est facile de comprendre que, dans le conflit moléculaire qui constitue ces actions, l'éther qui entoure les molécules soit vivement agité et devienne le siége d'ondulations de diverses rapidités. Si l'action chimique est faible, les vibrations les plus lentes possédent seules une amplitude assez grande pour être sensibles, et l'on n'observe que de la *chaleur*, fournissant des rayons de plus en plus réfrangibles, à mesure que l'action chimique est plus active. Quand cette action devient assez énergique pour donner aux vibrations les plus rapides une amplitude suffisante, la lumière accompagne la chaleur. L'expérience montre que la couleur des rayons lumineux dépend des substances en présence, et il en est de même probablement de la température à laquelle la lumière commence à se manifester; car on conçoit que, suivant la nature des molécules, les vibrations d'une certaine rapidité seront excitées de préférence à d'autres, et il est présumable que, si l'on pouvait augmenter graduellement l'énergie de l'action chimique, on trouverait que la température à laquelle la lumière commence à apparaître est d'autant plus élevée que la couleur de cette lumière se rapproche davantage d'être blanche ou violette. Ce qui confirme cette conjecture, c'est que l'incandescence due aux actions chimiques, quand elle est faible, donne de la lumière rouge. Si elle est plus intense, la lumière est blanche; ce qui montre que les rayons les plus réfrangibles se mêlent aux autres; et enfin, quand elle est très intense, ces derniers peuvent être les plus nombreux, comme cela a lieu dans la combustion, quand, suivant une expression usitée dans l'industrie, on chauffe *au bleu*.

§ 2. — COMPARAISON DU SYSTÈME DE L'ÉMISSION A CELUI DES ONDULATIONS.

I. Explication de la réflexion et de la réfraction dans le système de l'émission.

2249. Principes du système de l'émission. — Dans ce système, auquel Newton a donné son nom, la lumière consiste en particules de nature spéciale lancées par les corps lumineux avec une vitesse de 77000 lieues par seconde. Il y a une infinité d'espèces de particules, correspondantes aux différentes couleurs; elles ont une masse insensible, et cependant elles peuvent affecter la rétine. Il suffit, du reste, pour que l'impression soit continue, qu'il arrive 10 particules par seconde au fond de l'œil, car l'impression produite par chacune

d'elles dure environ $\frac{1}{10}$ de seconde. Il pourrait donc n'y en avoir que 10 dans un espace de 77000 lieues ; ce qui explique comment les rayons peuvent s'entrecroiser sans se gêner mutuellement. C'est à Biot que l'on doit les travaux les plus étendus sur le système de l'émission ; il en a suivi les conséquences pas à pas par le raisonnement et le calcul, et est parvenu à le plier à l'explication de la plupart des phénomènes ; mais ce n'a été qu'à force de sagacité et en introduisant fréquemment de nouvelles hypothèses, qui ne sont que la traduction des faits qu'il s'agit d'expliquer.

2250. Explication de la réflexion. — Pour expliquer la réflexion et en retrouver les lois, Newton suppose que la surface des corps exerce sur une partie des particules lumineuses, une répulsion qui diminue rapidement quand la distance augmente, et devient nulle dès qu'elle est appréciable. Soit AB (*fig.* 1655) la surface réfléchissante, *sa* un rayon incident, et *mn* un plan parallèle à AB, à partir duquel la répulsion commence à se faire sentir sur les particules lumineuses. Nous pouvons décomposer la vitesse de la particule arrivée en *a*, en deux composantes, l'une horizontale, l'autre verticale. La première n'est pas modifiée par la répulsion de la surface AB ; tandis que la seconde diminue à mesure que la particule s'enfonce au-dessous de *mn*. Cette composante finit par devenir nulle, puis, la répulsion agissant toujours, elle donne avec la composante horizontale, une résultante oblique de bas en haut, qui éloigne la particule et finit par lui donner la direction *br*. La répulsion étant la même, pour des distances égales de AB, on voit que les deux moitiés de la trajectoire *acb* seront symétriques par rapport à la normale DN, et qu'elles seront dans le même plan *sc*N ; d'où résultent les deux lois de la réflexion. — La distance D*c* sera d'autant plus petite, que la composante verticale de la vitesse sera plus grande, c'est-à-dire que l'angle d'incidence sera plus petit. Il pourra même arriver que le point *c* soit au-dessous de la surface AB, mais toujours à une distance de cette surface moindre que la distance à laquelle s'exerce la répulsion sur les particules lumineuses.

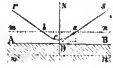


Fig. 1655.

2251. Réfraction. — Pour expliquer le partage de la lumière à la surface de séparation de deux milieux, en lumière réfléchie et lumière transmise, on suppose que les particules lumineuses possèdent deux pôles, dont un est attiré par le second milieu, tandis que l'autre en est repoussé. La particule est réfléchie ou réfractée suivant celui de ces pôles par lequel elle se présente à la surface de séparation. Considérons les particules qui pénètrent dans le second milieu. Soit *sa* (*fig.* 1656) un rayon incident ; dès qu'il arrive à la surface *mn*, l'attraction s'ajoute à la composante normale à AB, et la molécule se rapproche de plus en plus de la normale. Cet effet se continue au-dessous de la surface AB, jusqu'à la profondeur A*m'* égale au rayon de la sphère d'activité des molécules. A partir de *b*, la molécule recommence à marcher en ligne droite, car les attractions qu'elle subit s'entre-détruisent.

Si nous appelons v et v' les vitesses de la lumière dans les deux milieux, et i et r les angles d'incidence et de réfraction, la composante horizontale de la vitesse sera $v \sin i$ dans le premier milieu, et $v' \sin r$, dans le second; et comme cette composante ne change pas, on a $v \sin i = v' \sin r$, ou $\sin i : \sin r = v' : v$. On voit que, si, r étant moindre que i, le second milieu est plus réfringent que le premier, il faut que l'on ait $v' > v$, c'est-à-dire que la vitesse de la lumière soit la *plus grande* dans le milieu le plus réfringent. C'est l'inverse de ce qui a lieu d'après le système des ondulations (2233).

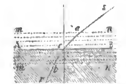


Fig. 1656.

Si le rayon, venant de r avec la vitesse v', passait du corps dans le vide, l'attraction de ce corps diminuant la composante normale, le rayon émergent se rapprocherait de la surface AB, et, de plus, la diminution étant égale à l'augmentation produite quand le rayon passe du vide dans le corps, la vitesse, en arrivant à la surface mn, serait égale à v. On voit aussi que si l'angle r était assez grand, la composante normale pourrait être assez petite pour être détruite avant que la particule m ne soit arrivée en mn. Alors elle reviendrait en dedans du corps, et l'on aurait le phénomène de la réflexion totale. Pour connaître la valeur minimum de r qui correspond à ce phénomène, il faut chercher quelle relation il y a entre l'indice de réfraction et l'action exercée par le corps sur une particule lumineuse; c'est ce que nous allons faire d'abord.

Puissance réfractive. — La puissance réfractive représente l'action du corps sur la particule lumineuse. Pour trouver cette action, soit $v \sin i$ et $v \cos i$, les composantes horizontale et verticale de la particule, à son arrivée à la surface mn. Pendant le passage de la particule, du plan mn au plan $m'n'$, la composante verticale est augmentée par la force attractive exercée par les molécules du corps. Quelle que soit la loi qui lie cette attraction à la distance, on peut toujours partager mA en tranches infiniment minces, dans chacune desquelles la force attractive soit constante; de manière qu'en appelant e l'épaisseur de chaque tranche; $f, f', f'' \ldots, f_n$, les attractions dans les différentes tranches; et $u, u', u'' \ldots, u_n$ les vitesses réalisées en arrivant à la 2e, à la 3e.... tranche, et enfin à la surface AB, on aura

$$u^2 = v^2 \cos^2 i + 2fe,\quad u'^2 = u^2 + 2f'e,\quad u''^2 = u'^2 + 2f''e,\quad \ldots u_n^2 = u^2_{n-1} + 2f_n e.$$

Le carré de la composante de la vitesse normale, en arrivant à la surface AB, sera donc égal à la somme de ces quantités, ou à $v^2 \cos^2 i + 2e\,(f + f' + \ldots + f_n)$. L'action du corps produisant les mêmes effets, de AB en $m'n'$, on aura la composante $v'^2 \cos^2 r$ de la vitesse en $m'n'$, en doublant le second terme, ce qui donnera

$$v'^2 \cos^2 r = v^2 \cos^2 i + 4e\,(f + f' + \ldots f_n).$$

La composante horizontale étant la même en a et en b, on aura $v^2 \sin^2 r = v^2 \sin^2 i$; et ajoutant les deux égalités membre à membre,

$$v'^2 = v^2 + 4e\,(f + f' + f'' \ldots + f_n)$$

La quantité entre parenthèses doit être regardée comme proportionnelle au nombre des molécules comprises dans la sphère d'attraction, c'est-à-dire proportionnelle à la densité d. Si donc on représente par k^2 un coefficient, constant pour une même substance, on pourra écrire $v'^2 = v^2 + k^2 d$; d'où, en remarquant que $v' : v = n$,

$$dk^2 = v^2\,(n^2 - 1), \qquad \text{ou} \qquad \frac{dk^2}{v^2} = n^2 - 1.$$

Le premier membre est proportionnel à l'action du corps, et il représente la *puissance réfractive*.

2252. Angle limite. — Le premier rayon incident qui ne peut émerger, est celui pour lequel la composante normale de la vitesse est détruite au moment où la particule lumineuse arrive en mn. Or, v et v' étant les vitesses dans le corps, et dans le vide, $v' \cos r$ est la composante normale en $m'n'$, et $v^2 \cos^2 r - dk^2$, cette composante en mn. L'angle limite sera donc donné par l'équation

$$v'^2 \cos^2 r - dk^2 = 0.$$

Or, on a $dk^2 = (n^2 - 1)\,v^2 = (n^2 - 1)\,(v'^2 : n^2)$; substituant, il vient $v'^2 \cos^2 r - (n^2 - 1)\,\dfrac{v'^2}{n^2} = 0$; d'où $\cos^2 r = 1 - \dfrac{1}{n^2}$, et $\sin r = \dfrac{1}{n}$, comme nous le savions. La réflexion se fait alors sur la surface mn ; mais, plus la valeur de r augmente, plus elle se fait près de AB. Enfin, elle a lieu en $m'n'$, quand on a $v' \cos r = 0$, ou $r = 90°$.

S'il s'agit de deux milieux consécutifs, et si n et n' sont leurs indices de réfraction, et v', v'' les vitesses de la lumière dans ces milieux, on aurait $n = \dfrac{v'}{v}$, $n' = \dfrac{v''}{v}$, d'où $\dfrac{n'}{n} = \dfrac{v''}{v'}$ pour l'*indice de réfraction relatif*.

II. Expériences qui permettent de décider entre les deux systèmes.

2253. On vient de voir que le système de l'émission rend compte d'une manière satisfaisante des lois de la réflexion et de la réfraction, mais il y a bien d'autres phénomènes qu'il ne peut expliquer, et certains cas où il est en contradiction avec les faits. Par exemple, on ne conçoit pas comment les particules lancées suivant la même droite dans deux rayons qui marchent en sens contraire, ne se gênent pas en s'entre-choquant ; le phénomène de l'interférence est inexplicable ; et il en est de même de l'absence d'impulsion sensible des

molécules lumineuses rassemblées au foyer d'une lentille (1866); car, si leur masse est d'une petitesse extrême, le nombre de celles qui se rendent au foyer est immense, et leur vitesse énorme. Enfin, puisque la matière pondérable agit par attraction sur ces particules, comment expliquer qu'elles traversent l'espace avec la même vitesse, quels que soient les astres dont elles émanent, ou ceux qui nous la renvoient par réflexion ? Nous trouverons bien d'autres circonstances où le systéme de l'émission se trouve en défaut.

Il se présente, du reste, une particularité qui permet de prononcer entre ce systéme et celui des ondulations. Nous avons vu que, d'après le premier, la vitesse de la lumière est plus grande dans les milieux les plus réfringents que dans les moins réfringents ; c'est le contraire dans le systéme des ondulations (2233). On pourrait donc décider entre les deux systémes, en comparant directement les vitesses de la lumière dans deux milieux différents, par exemple dans l'eau et dans l'air. Cette idée est due à Arago, et il a cherché à la mettre en pratique.

2254. Proposition et essais d'Arago. — En 1839, Arago, aprés avoir reconnu toute la fécondité de la méthode du miroir tournant, employée par M. Wheatstone dans ses recherches sur la vitesse de l'électricité (III, 1601), songea à en faire usage pour comparer les vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau ; il exposa en détail le systéme d'expériences qu'il se proposait d'instituer, et fit même construire par M. Breguet, les appareils destinés à les exécuter [1]. Le principe de la méthode consiste à recevoir les rayons partant de deux points lumineux brillant instantanément l'un au-dessus de l'autre, sur un miroir tournant autour d'un axe vertical. Les rayons partant de l'un des deux points n'arrivent au miroir qu'aprés avoir traversé une colonne d'eau. Si la lumiére ne marche pas avec la même vitesse dans ce liquide et dans l'air, les images réfléchies ne seront plus sur la même verticale. Celle qui sera en avant, dans le sens du mouvement du miroir, correspondra aux rayons qui auront marché le plus lentement, le miroir ayant eu le temps de se déplacer pendant le temps qui sépare les moments d'arrivée des deux lumiéres à la surface du miroir. Avec une vitesse de 1000 tours par seconde et une colonne d'eau de 14 mètres de longueur, le calcul indiquait une déviation de 30 secondes entre les deux points lumineux. Pour saisir le double faisceau réfléchi, afin d'observer cette déviation, Arago proposait de disposer tout autour du miroir, des observateurs munis chacun d'une lunette, et de faire jaillir la lumiére des deux points un grand nombre de fois, jusqu'à ce que le hasard dirigeât le double faisceau réfléchi, dans l'une des lunettes. Mais l'affaiblissement de la vue de l'illustre astronome ne lui permit pas d'exécuter ces expériences, dont il lui reste le mérite d'avoir posé les bases. MM. L. Foucault et Fizeau imaginérent, chacun de leur côté, et à la même époque, des appareils qui leur ont permis de ramener dans une direction constante les faisceaux réfléchis par le miroir tournant.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXI, p. 49.

2255. Expérience de M. L. Foucault. — Considérons un trait lumineux S perpendiculaire au plan de la figure 1657, et soit K une lentille convergente achromatique ; il se formera en S′ une image du trait S. Si l'on place un miroir plan en *mn*, cette image sera rejetée, par la réflexion, en un point *s′* symétrique de S′, et si le miroir *mn* tourne autour d'un axe *o*, cette image décrira un arc de cercle ayant son centre en *o*, et soutendant un angle double du déplacement angulaire du miroir (1904). Plaçons en *s′* un miroir sphérique M ayant aussi son centre en *o*. Les rayons réfléchis en *mn* et tombant en *s′*, seront renvoyés par le miroir M en un faisceau qui coïncidera avec le faisceau incident, se réfléchira de nouveau en *mn*, et reviendra en S, au point de départ ; et cela, quelle que soit la position du miroir tournant *mn*, pourvu que le faisceau

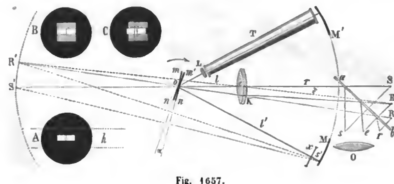


Fig. 1657.

qu'il réfléchit rencontre le miroir M. Comme l'image qui est ainsi renvoyée en S, se confond avec le point lumineux lui-même, on dispose en *ab* une glace sans tain sur laquelle se réfléchissent en partie, dans la direction *os*, les rayons renvoyés par *mn*, de manière qu'en plaçant l'œil en *s*, on verra cette image, par intermittences si le miroir tourne lentement, et d'une manière continue s'il fait plus de 10 tours par seconde. Cette image s'observe au moyen d'une loupe O munie d'un fil focal. Si l'on fait en sorte que l'image coïncide avec le fil quand le miroir ne fait que 20 à 30 tours par seconde, on la voit s'en écarter dans le sens de la rotation du miroir quand il fait plusieurs centaines de tours. Par exemple, le miroir tournant dans le sens de la flèche, l'image se déplace, de S en R, ou de *s* en *r*. Le déplacement de l'image provient de ce que le miroir *mn* a eu le temps de tourner d'une quantité sensible pendant que la lumière réfléchie s'est transportée de *o* en *s′* et de *s′* en *o* ; l'axe du faisceau réfléchi pour la seconde fois sur *mn* est donc dévié, et forme en *o* avec le faisceau incident S*o* un angle double du déplacement angulaire du miroir.

Calcul de la vitesse. — Voyons maintenant comment la vitesse de la lumière est liée à la *déviation* observée. Soit *r* la distance Sc du point S à la

lentille K ; l et l' les distances co et os' ; d l'arc de déviation SR ou sr ; n le nombre de tours que fait le miroir mn par seconde ; et enfin V la vitesse de la lumière. Le rayon réfléchi en M trouvant le miroir mn, en $m'n'$, quand il y revient, se réfléchit suivant oK, et la déviation serait SoR, si le rayon n'était pas déplacé par la lentille cK, ou, ce qui revient au même, si le point c se confondait avec o. Supposons d'abord qu'il en soit ainsi ; alors l'angle de déviation SoR est double du déplacement angulaire α que subit le miroir pendant que la lumière franchit l'espace $2\overline{os'} = 2l'$. Le temps employé par la lumière pour parcourir cet espace est $2l' : V$; et le déplacement angulaire du miroir pendant ce temps, $\alpha = 2nl' : V$; puisqu'il fait n tours par seconde. La déviation sera donc $2\alpha = 4nl' : V$, et l'arc correspondant, ayant pour rayon $oS = r + l$, sera $d = 2\alpha \cdot 2\pi \cdot oS = 8\pi nl' \overline{(r+l) : V}$.

Mais le rayon réfléchi oK est dévié par la lentille cK ; menons R$'c$, par le centre optique c et par R$'$, point symétrique de s' par rapport au miroir $m'n'$; l'image du point R$'$ formé par la lentille sera en E, et l'angle de déviation sera $\delta = $ ScE. Or, les triangles oR$'$S$'$, cR$'$S$'$ donnent $\sin R'cS' = \sin\delta = R'S' : S'c = R'S' : (l + l')$, et $\sin R'oS' = \sin 2\alpha = R'S' : l'$. Divisant ces deux égalités membre à membre, prenant les angles pour les sinus, et remplaçant 2α par sa valeur $4nl' : V$, il vient $\delta = 4nl'^2 : V(l + l')$. L'arc SE $= D = 2\pi r\delta$, dont le rayon est r, est alors

$$D = \frac{8\pi l'^2 nr}{V(l+l')}; \qquad \text{d'où } V = \frac{8\pi l'^2 nr}{D(l+l')},$$

formule qui donne la vitesse de la lumière dans l'air, en fonction de D.

En supposant V connu, on peut trouver quel serait D dans les conditions données. Par exemple, si l'on fait r — Sc = 3^m, $l' = os' = 4^m$, et $l = co = 1^{mm},18$, et si l'on suppose que le miroir fasse 800 tours par seconde, on trouve une déviation de $0^{mm},6$; quantité facile à distinguer à l'œil nu, et à plus forte raison avec une loupe. On peut donc ainsi mesurer la vitesse de la lumière, en ne disposant que d'une distance de 4 mètres !

Vitesse dans l'eau. — Cette méthode peut servir à mesurer la vitesse de la lumière dans l'eau. Il suffit pour cela de faire franchir aux rayons, une colonne d'eau T limitée par des glaces parfaitement planes, et disposée entre le miroir tournant mn et le miroir sphérique M$'$. Seulement, comme, la colonne d'eau déviant les rayons, le foyer ne se ferait pas en M$'$, on dispose en L une lentille divergente, qui corrige l'effet de cette colonne.

Remarquons que la colonne d'eau ne pouvant exister dans toute la distance oM$'$, on n'obtient en réalité que la vitesse moyenne U de la lumière, dans un espace occupé en partie par l'eau, et en partie par l'air. Si E et A sont les espaces occupés par ces deux fluides, et V$'$ et V les vitesses que possède la lumière, les temps employés à parcourir les espaces A et E seront

$\frac{A}{V}$ et $\frac{E}{V'}$, et le temps total, $\frac{A}{V}+\frac{E}{V'}=\frac{AV'+EV}{VV'}$. Si l'on divise l'espace total A+E par ce temps, on obtiendra la vitesse moyenne

$$U=\frac{VV'(A+E)}{AV'+EV}; \qquad \text{d'où } V'=\frac{EVU}{(A+E)V-AU};$$

formule dans laquelle V et U sont donnés par l'expérience.

Comparaison des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau. — Pour savoir laquelle de ces deux vitesses est la plus grande, il suffit d'observer quelle est la plus grande des déviations, quand les rayons traversent simplement l'air, ou quand ils traversent une colonne d'eau. Voici comment M. L. Foucault fait très facilement cette comparaison. En S (*fig.* 1657) est un écran, percé d'une ouverture carrée, traversée par un fil très fin, ou *mire*, parallèle à l'axe du miroir tournant, et dont on observe la déviation. On fait d'abord coïncider l'image de cette mire avec le fil focal de la loupe O, quand la vitesse de rotation est assez faible pour qu'il n'y ait pas de déviation. Un second miroir sphérique, ayant son centre en *o*, est placé en M'; de manière que les intermittences lumineuses renvoyées en *s* sont deux fois plus fréquentes qu'avec le seul miroir M. Les rayons envoyés en M' ont à traverser deux fois une colonne d'eau T. Devant le miroir M est placé un écran *x*, représenté à part en A, percé d'une fente horizontale moins haute que l'ouverture carrée de l'écran placé en S; de sorte que l'image observée en O présente la forme d'un carré, à travers lequel se dessine l'image de la mire, et dans lequel on distingue sur un fond verdâtre formé par la lumière qui a traversé la colonne d'eau, une bande horizontale blanche et plus éclatante formée par la superposition des rayons réfléchis en M et M', comme on le voit en B. Quand le mouvement du miroir *mn* est très rapide, la déviation se manifeste, l'image de la mire ne coïncide plus avec le fil du micromètre, et l'image de l'ouverture carrée prend l'aspect représenté en C. La bande blanche moyenne est moins déviée que le reste du carré lumineux; d'où l'on doit conclure que le miroir *mn* se déplace moins pendant le passage de chaque pulsation lumineuse à travers l'air, que pendant son passage à travers l'eau. Avec les dimensions ci-dessus, et en supposant, de plus, $E=3^m$, et $A=1^m$, la différence des déviations était de 0^{mm},094, quand le miroir faisait 500 tours par secondes. *La vitesse de la lumière est donc moindre dans l'eau que dans l'air*, comme il résulte du système des ondulations. *Le système de l'émission est donc en contradiction avec l'expérience*, et doit, par conséquent, être rejeté.

Disposition du miroir tournant. — Il nous reste à donner une idée du mécanisme très simple au moyen duquel M. L. Foucault fait tourner le miroir plan. Ce miroir, représenté en *m* (*fig.* 1658), est composé de deux parties parallèles, enchâssées dos à dos dans un anneau, et formées de deux morceaux de glace argentés; l'étamage au mercure ne résistant pas à la force centrifuge lors des grandes vitesses. Ce système est fixé à l'arbre d'une petite turbine

à vapeur r, disposée à peu près comme la syrène acoustique (1,533), et dont on voit une coupe en $r'r'$. La vapeur arrivant en V sort par deux ouvertures sous la roue r, $r'r'$, dont elle frappe les aubes obliques. Elle est fournie par une petite chaudière, et elle traverse un tube aplati T, chauffé par une lampe à alcool, dans lequel elle se dessèche. Le nombre de tours accomplis en une seconde, se déduit du son produit par la sortie de la vapeur, au moyen d'un calcul inverse de celui qu'on fait quand on se sert de la syrène.

L'axe tournant est terminé par des pointes qui s'engagent dans les cavités coniques de deux vis d'acier munies d'un petit canal, par lequel arrive constamment de l'huile venant de réservoirs voisins, b. Cette huile est pressée par de l'air, arrivant par les tubes t, t' et comprimé dans des flacons, au moyen de

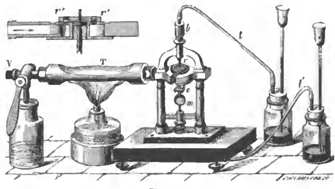


Fig. 1658.

colonnes de mercure. Une pièce triangulaire o sert à faire coïncider, par tâtonnement, l'axe d'inertie avec l'axe de figure du système tournant; on lime plus ou moins les angles et l'on déplace dans le sens vertical, des vis placées près de ces angles. On reconnaît que la condition est à peu près remplie, quand la rotation n'est plus accompagnée d'un son produit par les vibrations de l'arbre.

2256. Expériences de MM. Fizeau et Breguet. — Pendant que M. L. Foucault démontrait que la lumière se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau, MM. Fizeau et Breguet arrivaient, de leur côté, au même résultat, par une méthode semblable. Dans leur appareil, qui était installé dans une des salles de l'Observatoire de Paris, le mouvement était imprimé au miroir plan par un mécanisme d'horlogerie, construit par M. Breguet avec une telle perfection qu'on pouvait obtenir une vitesse de 2000 tours par seconde; mais les expériences ont été faites avec des vitesses de 500 à 600 tours seulement. Les autres parties de l'appareil et la manière d'expérimenter ne diffèrent que par des détails des dispositions et de la marche adoptés, de son côté, par M. L. Foucault, ce qui nous dispense d'entrer dans de plus grands détails.

CHAPITRE VII.

DE LA DIFFRACTION. — RÉSEAUX.

§ 1. — DIFFRACTION.

I. Diffraction par des bords rectilignes indéfinis.

2257. Avant Grimaldi, on admettait que les rayons lumineux qui rasent un corps opaque continuent à marcher en ligne droite, et que l'ombre projetée derrière ce corps est limitée par la surface du cône enveloppant ayant son sommet au point lumineux; surface que l'on appelle la limite de l'*ombre géométrique*. Mais, s'il semble en être ainsi quand la source de lumière présente certaines dimensions, il n'en est plus de même quand ces dimensions sont assez petites pour qu'on puisse la considérer comme un point; alors, il pénètre de la lumière à l'intérieur de l'ombre géométrique, et certains points de l'espace extérieur sont obscurs. Ces phénomènes ont été découverts par Grimaldi, en 1665, sur des rayons ayant traversé un petit trou, et il leur a donné le nom de *diffraction*. Les phénomènes de diffraction ont été étudiés par Newton, Fraunhofer et Young; et leurs lois ont été découvertes par Fresnel, à l'aide de la théorie des ondulations, et expliquées par lui au moyen du principe des interférences.

2258. Description des phénomènes. — 1° Considérons un écran AB (*fig.* 1661) à bord rectiligne A, et un trait lumineux *s* de lumière *simple* parallèle à ce bord. La limite de l'ombre géométrique sur un écran *n*P placé à une certaine distance, sera une droite P parallèle au bord A. Mais l'expérience montre que la lumière pénètre dans l'ombre géométrique, jusqu'à une petite distance, en diminuant rapidement d'intensité d'une manière continue. De plus, on observe dans l'espace P*n* des franges alternativement brillantes et sombres, parallèles au bord de l'écran, allant en diminuant de netteté, et disparaissant à une certaine distance du point P.

2° Quand la lumière partant du trait *s*, passe par une fente étroite qui lui est parallèle, il se forme des franges d'autant plus espacées que la fente est plus étroite; les unes dans l'intérieur du faisceau géométrique, les autres en dehors. Les premières changent d'aspect suivant la distance de l'écran.

3° Deux fentes très rapprochées produisent aussi des franges, d'autant plus écartées que les fentes sont plus rapprochées.

4° Si l'on remplace la fente par un écran étroit parallèle au trait lumineux, il se forme, tant dans l'ombre géométrique qu'en dehors, des franges d'autant plus écartées que l'écran est plus étroit.

Fresnel a constaté que les résultats sont indépendants de l'épaisseur, de la forme, de l'état et de la nature des bords des fentes ou des écrans. Par exemple, le bord de l'écran étant dans les différentes parties de sa longueur, arrondi, tranchant, poli ou dépoli, recouvert de noir de fumée, fait de verre ou de laiton, les franges conservent leur régularité dans toute leur longueur. Malus et Berthollet avaient déjà fait quelques observations analogues. De Haldat, après les avoir répétées, a cherché à modifier encore plus profondément les surfaces que rasent les rayons diffractés : il a employé des lames de fer ou de cuivre chauffées au rouge blanc, ou refroidies à —10° ; des lames de fer

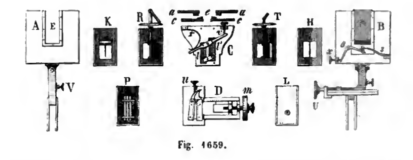


Fig. 1659.

aimantées par des aimants très puissants ; il a fait passer à travers les fils servant d'écran étroit, des décharges électriques ou des courants capables de les faire rougir à blanc ; enfin, il a projeté au travers des faisceaux lumineux, avant leur arrivée à l'obstacle devant les diffracter, des traits vifs de lumière, des décharges électriques ; les franges ont toujours conservé leur même aspect[1].

Quant aux lois des phénomènes, nous les ferons connaître en développant l'explication d'où elles découlent, et nous en agissons ainsi d'autant plus volontiers, que la plupart n'ont été découvertes qu'à l'aide de la théorie.

Franges irisées. — L'expérience prouve que les franges formées avec des rayons de lumière simple sont d'autant plus serrées, que ces rayons sont plus réfrangibles. Il résulte de là que la lumière blanche donnera des franges irisées dans lesquelles le violet sera en dedans, c'est-à-dire du côté de la droite passant par le point lumineux et par le bord de l'écran, ou par le milieu de la fente ou de l'écran étroit. La lumière sera donc *décomposée par diffraction*. —

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLI, p. 424.

Ajoutons que Young, Arago, M. Abria ayant reçu les franges de diffraction sur une couche de chlorure d'argent, ont vu ces franges s'y dessiner; ce qui prouve une fois de plus l'identité des rayons chimiques et lumineux.

2259. Manière d'observer les franges de diffraction. — Les expériences de diffraction se font avec le *banc de diffraction* (*fig.* 1648). La lumière part de la ligne focale d'une lentille cylindrique recevant les rayons solaires. Cette lentille est ajustée dans l'échancrure rectangulaire E d'un support AV (*fig.* 1659), au moyen de coulisses dont on voit la coupe en *aea*. La vis V sert à placer la lentille bien verticalement. Quand on veut la remplacer par une fente, on glisse dans la coulisse, le système C, *cc*, portant deux lames parallèles *l*, *l'*, articulées par leurs extrémités avec deux petites barres aussi parallèles. La vis *v*, à laquelle s'oppose le ressort antagoniste *r*, sert à faire varier la largeur de la fente, en modifiant les angles du parallélogramme *ll'*.

Un second support, semblable à A, reçoit différentes plaques, ou *fiches*, destinées à diffracter la lumière. Veut-on observer les franges produites par le bord d'un écran, on emploie un systéme semblable à C, dont on a enlevé la lame *l'*; la vis *v* sert alors à déplacer le bord de l'écran parallèlement à lui-même. — La fiche D, dont la disposition est due à Sgravesande, sert à observer les effets produits par une fente étroite. La largeur de la fente peut être modifiée et mesurée au moyen de la vis micrométrique *m*. La vis *u* est destinée à incliner l'un des bords, quand on veut que la fente soit plus large à une extrémité qu'à l'autre.—Les effets d'un écran étroit s'observent au moyen de la fiche H, portant une large ouverture dans laquelle est tendu un fil métallique. — Pour expérimenter avec deux fentes, on emploie un système de trois gros fils métalliques, P, laissant entre eux un très petit espace.

Les franges sont reçues soit sur un écran en verre dépoli fixé à un support que porte la règle du banc de diffraction, soit au foyer du micromètre de Fresnel, au moyen duquel on peut mesurer leurs distances relatives.

On observe facilement des franges, en regardant la flamme d'une bougie à travers une fente faite dans une carte par la pointe d'un canif, ou en plaçant devant l'œil un cheveu, qui représente un écran étroit.

2260. De l'explication de la diffraction. — On a d'abord voulu attribuer la diffraction à la présence d'une couche d'air condensée à la surface des corps, et déviant les rayons lumineux par réfraction. De Mairan, qui soutenait cette opinion, admettait en outre des réflexions dans les couches d'air, dont la densité augmentait rapidement en s'approchant de la surface du corps. Mais Newton montra que la diffraction se produit avec un cheveu entouré d'eau entre deux lames de verre, et il supposa que les particules lumineuses qui rasent les bords d'un écran en sont attirées ou repoussées, suivant la distance. Il y a d'abord attraction décroissante quand on s'éloigne du bord, puis répulsion, puis attraction, et ainsi de suite jusqu'à une très petite distance. On peut rendre compte d'une partie des phénomènes, au moyen de cette hypothèse peu vraisemblable; mais on ne voit pas pourquoi la forme et la nature des bords

des écrans n'ont pas d'influence sur les franges. En outre, celles qui se forment dans l'ombre d'un corps étroit ne peuvent s'expliquer, et Newton niait même l'existence de ces franges, qui pourtant sont faciles à observer. Nous allons voir avec quelle simplicité la théorie des ondulations rend compte de tous les phénomènes de diffraction. Les premiers essais dans cette voie sont dûs à Young ; il voyait dans les franges, le résultat d'interférence des rayons réfléchis par les bords des corps, avec des rayons directs ; mais la nature de ces bords devrait avoir de l'influence, au moins sur l'intensité du phénomène, et il existe des faits en contradiction avec cette explication. Fresnel, en partant du principe d'Huyghens et de celui des interférences, est arrivé à donner une théorie complète des phénoménes de diffraction, et à calculer analytiquement, dans les différents cas, les effets résultants des ondes élémentaires aux différents points d'un écran sur lequel sont reçues les franges ; effets inégaux quand des obstacles interceptent une partie de la surface de l'onde [1]. M. Cauchy et M. Knochenhauer, ont considéré le cas des franges produites par les fentes, et M. Quet, ce dernier cas et celui des franges produtes par un écran très étroit [2]. M. Schwerd a publié un *Traité sur les phénomènes de diffraction*. Ces divers travaux mathématiques ont conduit constamment à des résultats d'accord avec ceux de l'expérience. Ne pouvant suivre ici cette marche analytique, nous emploierons une méthode élémentaire , donnée par Fresnel, et qui s'appuie sur un lemme que nous allons d'abord faire connaître.

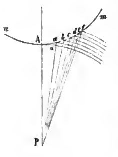


Fig. 1660.

2261. Lemme. — Soit un point P (*fig.* 1660) placé à une certaine distance du point lumineux, et *nm* la surface d'une onde sphérique ayant son centre en ce dernier point; l'ébranlement lumineux reçu au point P peut, d'après le principe d'Huyghens (2217), être considéré comme l'effet résultant des actions exercées en ce point par les ondes émanant des divers points de la surface *um*, considérés comme autant de centres d'ébranlement. Il est facile de voir que l'*effet résultant produit au point* P *n'est dû qu'aux portions de la surface d'onde nm très voisines de la ligne* PA *normale à cette surface*, ou voisine du point A , que nous appellerons le *pôle* du point P. En effet, désignons par γ la distance AP, et décrivons du point P comme centre avec des rayons égaux à γ, $\gamma+\frac{1}{2}\lambda$, $\gamma+\frac{2}{2}\lambda$, $\gamma+\frac{3}{2}\lambda$..., des arcs de cercle, qui divisent l'arc A*m*, aux points *a*, *b*, *c*, *d*..., en parties de plus en plus petites, que nous nommerons *éléments d'interférences*. Deux éléments consécutifs seront de moins en moins différents, de manière qu'on pourra les regarder comme égaux, à partir d'un certain point, *d* par exemple. Si nous joignons les points

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XI, p. 246.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLIX, p. 385 et 417.

a, b, c, d, e... au point P, les rayons dP, eP seront sensiblement parallèles, et comme leur différence de longueur est égale à $\frac{1}{2}\lambda$, ces rayons interféreront en arrivant au point P. On pourra en dire autant de tous les rayons partant des différents points des arcs sensiblement égaux de, ef; les ébranlements provenant de tous les points de ces arcs s'entre-détruisent donc deux à deux; Il en sera de même des arcs situés au-delà du point d considérés deux à deux, de sorte que la lumière reçue en P, proviendra presque totalement des arcs les plus rapprochés du *pôle* A, arcs qui sont inégaux entre eux. Ainsi, les ébranlements produits par les différents points de l'arc Aa, ne pourront être détruits que partiellement par ceux qui proviennent des points moins nombreux de ab. Ceux-ci étant eux-mêmes en partie détruits par ceux qui proviennent de l'arc bc, l'action de Aa l'emportera notablement sur ce qui restera de celle de ab.

On voit que l'intensité de la lumière envoyée en P par les différentes parties de la surface de l'onde, décroîtra très rapidement à mesure que ces parties s'éloigneront du pôle A. Le sens du mouvement vibratoire de l'éther en P sera donc déterminé par celui qui correspond au premier arc Aa, et la lumière reçue en P sera plus intense dans la direction de la normale PA à la surface de l'onde que dans une direction oblique, comme l'avait déjà établi Huyghens, et même sera nulle dés qu'on s'écartera un peu de cette normale, comme le montre, du reste, l'expérience. — Si nous désignons par 1 l'intensité lumineuse produite en P par la demi-onde Am, celle qui résultera de l'action des deux moitiés de l'onde sera égale à 2; elle sera, du reste, plus petite que celle qui résulterait des actions des deux premiers arcs égaux à Aa s'ils étaient seuls, puisqu'une partie de leur effet est détruite par les arcs suivants.

2262. Explication des effets produits par les bords d'un écran. — Joignons le point lumineux s au bord A de l'écran (*fig.* 1661). La lumière reçue au point P proviendra de la demi-onde Am et sera représentée par 1. Considérons un point c tel que l'on ait $Ac - ac = \frac{1}{2}\lambda$. Ce point recevra, de la surface am, de la lumière d'intensité 1, et de l'arc aA, de la lumière d'intensité l, l étant plus grand que 1; car les ébranlements émanant des différents points de l'arc aA ne sont plus partiellement détruits par ceux qui émaneraient de l'arc suivant, puisque ce dernier n'existe pas. Il y aura donc en c une lumière plus vive qu'en P, et d'intensité $1+l$.

Considérons le point n tel que $An - nb = 2\frac{1}{2}\lambda$, et divisons l'arc A$b$ en deux parties Aa', $a'b$, telles que l'on ait $An - a'n = \frac{1}{2}\lambda$, et $a'n - bn = \frac{1}{2}\lambda$, le point a' étant nécessairement différent du point a. Les actions engendrées par les différents points des deux arcs Aa', $a'b$, se détruiront presque totalement, et l'intensité lumineuse en n ne sera que $1+k$, k étant très petit. En c' (*fig.* 1662), point tel que l'on a $c'A - c'd = \frac{3}{2}\lambda$, l'intensité sera $1+l'$, l' étant

[1] Dans cette figure, ainsi que dans celles qui suivent, on a énormément exagéré les distances des franges, et les longueurs qui représentent la valeur de λ.

beaucoup plus grand que 1 ; les actions provenant des différents points des deux arcs les plus éloignés de *d* s'entre-détruisant presqu'entièrement, celles qui émanent du plus rapproché conservent presque tout leur effet, et *l'* est à peine moindre que *l*. On verra de même qu'un peu au-delà de *c'*, la lumière n'aurait qu'une intensité à peine supérieure à 1.... On aura donc alternativement des points sombres et brillants, ou des franges, si le point *s* est remplacé par un trait lumineux parallèle au bord de l'écran. Ces franges seront de moins en moins nettes ; les arcs dont les effets se détruisent ne le faisant pas totalement, de sorte qu'un peu de lumière s'ajoute aux bandes sombres, en quantité d'autant plus grande que leur ordre est plus élevé. Enfin, aux points tellement éloignés de P, que la partie interceptée de la demi-onde circulaire est trop éloignée du pôle *d* pour avoir une influence sensible, la lumière sera uniforme et d'intensité 2.

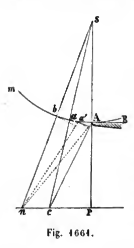


Fig. 1661.

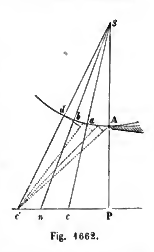


Fig. 1662.

La longueur λ étant plus petite pour les rayons violets que pour les rouges, les franges seront plus serrées pour la première espèce de rayons que pour la seconde ; de là les franges irisées que donne la lumière blanche.

Trajectoire hyperbolique des franges. — La trajectoire formée par une frange d'un certain ordre, considérée à différentes distances de l'écran AB. est une *hyperbole* dont les foyers sont en A et *s*. En effet, si l'on considère la frange obscure *n* (*fig.* 1661), de rang *m*, on a $An - bn = m\frac{1}{2}\lambda$. Retranchant terme à terme, de l'identité $sb = sA$, il vient $sn - An = sA - m\frac{1}{2}\lambda$. La différence $sn - sA$ est donc constante quelle que soit AP ; et la trajectoire forme une branche d'hyperbole ayant A et *s* pour foyers.

Pour avoir l'équation de cette hyperbole en fonction de la distance $sA = 2C$ (*fig.* 1661), de la longueur d'ondulation λ, et du nombre *m*, posons $AP = x$, $Pn = y$, et cherchons les valeurs des axes 2A et 2B de la courbe. On a d'abord $2A = sn - An = 2C - m\frac{1}{2}\lambda$; d'où $A^2 = C\left(C - m\frac{1}{2}\lambda\right)$, en négligeant le terme qui contient λ^2. La relation connue $B^2 = C^2 - A^2$ donne alors $B^2 = C^2 - C\left(C - m\frac{1}{2}\lambda\right) = mC\frac{1}{2}\lambda$. L'équation de l'hyperbole rapportée à son centre et à ses axes, est donc

$$C\left(C-m\tfrac{1}{2}\lambda\right)y^2-mC\tfrac{1}{2}\lambda x^2=-C^2\left(C-m\tfrac{1}{2}\lambda\right)m\tfrac{1}{2}\lambda,$$

ou $$Cy^2-m\tfrac{1}{2}\lambda x^2=-C^2m\tfrac{1}{2}\lambda,$$

en négligeant $m\frac{1}{2}\lambda$ devant C, ainsi que le terme en λ^2 — Si l'on veut rapporter la courbe au point A comme origine, il faut remplacer x par $x+C$, et l'on obtient une nouvelle équation, d'où l'on tire

$$y^2=\frac{m\frac{1}{2}\lambda(x^2+2Cx)}{C}.$$

On voit que y est proportionnel à la racine carrée de m; par conséquent, les franges seront d'autant plus serrées que leur ordre sera plus élevé. On voit aussi que, pour les mêmes valeurs de m et de x, y est d'autant plus petit que C est plus grand. Les franges seront donc d'autant plus éloignées de l'ombre géométrique, et, par conséquent, d'autant plus écartées les unes des autres, que le point lumineux s sera plus rapproché de l'écran A.

Tous ces résultats ont été vérifiés par Fresnel, au moyen de son micromètre. Comme la limite de l'ombre géométrique n'est pas apparente, pour mesurer sa distance aux franges, Fresnel avançait, du côté opposé au bord A, un autre écran assez éloigné pour que les franges produites par les deux bords ne se modifiassent pas mutuellement; il déduisait ensuite la distance des limites des deux ombres géométriques, de la distance du trait lumineux au plan commun des écrans, et de sa distance à l'écran qui recevait les franges. Mesurant ensuite l'intervalle entre deux franges de même ordre appartenant aux deux systèmes, il la retranchait de la distance des limites des ombres géométriques, et obtenait ainsi le double de la distance d'une de ces franges à la limite d'ombre du même côté.

Lumière dans l'ombre géométrique. — Les points pris dans l'ombre géométrique, recevront la lumière d'une portion d'onde d'autant plus petite et plus éloignée du *pôle* correspondant, que ces points seront plus éloignés du bord de l'écran, et la partie la plus efficace de cette portion étant enlevée dans un espace de plus en plus grand, l'éclat ira en diminuant rapidement, mais d'une manière continue, et il n'y aura pas d'intermittences comme en dehors de l'ombre.

Remarque. — On voit pourquoi la nature et la forme du bord de l'écran n'ont pas d'influence sur les résultats, l'écran ne faisant qu'intercepter une partie de la surface de l'onde. Cependant, si cet écran était très épais et si son bord présentait une courbure peu prononcée, la surface de l'onde, considérée à la face postérieure de l'écran, n'aurait plus une intensité uniforme, car elle recevrait des franges provenant d'une surface d'onde passant par la face antérieure. Mais ces franges sont très faibles, très étroites, et négligeables tant que l'écran n'est pas trop épais.

Franges au bord d'un miroir. — On peut obtenir des franges au bord

d'un miroir incliné ; car les rayons réfléchis sont dans le même cas que s'ils venaient de l'image symétrique du trait lumineux. L'espace au-delà du miroir remplaçant l'écran, les franges se font du côté du miroir, tandis que la lumière continue se manifeste au-delà de son bord libre. On voit en R (*fig.* 1659) la section transversale du petit miroir incliné servant à cette expérience ; au-dessous est dessinée la fiche à laquelle il est fixé.

2263. Franges produites par une fente. — Dans ce cas, il peut se former des franges dans la partie éclairée et dans l'ombre, soit simultanément, soit séparément, et la frange centrale peut être obscure ou brillante, suivant la largeur de la fente, ou la distance à laquelle on observe les franges.

1° Franges intérieures. — Soit AB la fente (*fig.* 1663), *s* le trait lumineux, et supposons d'abord l'écran A'B' placé à une distance telle que les différences AP — *o*P et BP — *o*P soient égales à $\frac{1}{2}\lambda$; tous les points de la partie AB de la surface de l'onde enverront en P des ébranlements concordants. Il en sera de même, *à fortiori*, si l'écran A'B' est plus éloigné ; la différence AP — *o*P étant alors moindre que $\frac{1}{2}\lambda$. Il y aura donc une bande brillante en P. — Si nous rapprochons l'écran A'B', de manière que la différence AP — *o*P = BP — *o*P soit plus grande que $\frac{1}{2}\lambda$ et égale à $n\frac{1}{2}\lambda$, quand *n* sera *pair*, chaque moitié de la partie AB de l'onde pourra se diviser en un nombre pair d'*éléments d'interférence* (2261) dont les actions se détruiront deux à deux ; la frange centrale sera donc obscure. Si *n* est impair, il restera un de ces éléments qui ne sera pas détruit, et la frange centrale sera brillante. Cette frange sera donc successivement brillante ou obscure, quand on écartera peu à peu l'écran de la fente, jusqu'à ce que la distance *o*P soit telle que AP — *o*P = $\frac{1}{2}\lambda$; distance à partir de laquelle la frange centrale restera toujours brillante. — Au lieu de faire varier la distance *o*P, on peut la laisser constante, et rétrécir la fente, ce qui produira le même effet que si l'on éloignait l'écran. Tous ces résultats se vérifient par l'expérience.

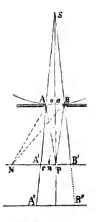


Fig. 1663.

Voyons maintenant ce qui se passe en A'B' à droite et à gauche du point P, et supposons, pour fixer les idées, que la frange centrale soit brillante et que l'on ait AP — *o*P = $\frac{1}{2}\lambda$; il sera facile d'étendre ce que nous allons dire au cas d'une frange centrale obscure. Considérons le point *n* tel que B*n* — A*n* = $2\frac{1}{2}\lambda$. Nous pourrons partager l'arc AB en deux parties *a*A, *a*B telles que l'on ait *n*B — *na* = *na* — *n*A = $\frac{1}{2}\lambda$. Les ébranlements communiqués au point *n* par les deux arcs A*a*, *a*B se détruiront en grande partie, de manière qu'il y aura en *n* une bande sombre. En *c*, tel que *c*B — *c*A = $\frac{3}{2}\lambda$, il y aura une bande lumineuse ; car on pourra partager l'arc AB en trois éléments d'interférence. Les actions des éléments les plus éloignés de *c* se détruiront

presque totalement, et il restera l'effet de l'arc contigu au bord A, arc qui donnera en c une bande lumineuse ; et ainsi de suite.

Il est facile de voir que les franges seront d'autant plus écartées que l'écran A'B' sera plus éloigné de la fente ; car, pour avoir la même différence dans les rayons nA, nB, il faut d'autant plus s'éloigner du point P que la distance oP est plus grande ; il en est de même quand la fente devient plus étroite. Si l'écran vient à une distance A''B'' telle que $BA'' - AA'' = \frac{1}{2}\lambda$, la première bande sombre sera en A'', et, par conséquent, il n'y aura pas de franges dans l'espace éclairé ; et cela aura lieu pour une distance d'autant plus petite de l'écran, que la fente sera plus étroite.

Trajectoire des franges. — Ces résultats peuvent aussi se déduire de la courbe que forme une frange d'un même ordre quand l'écran se déplace. Cette courbe est évidemment une branche d'hyperbole dont les foyers sont en A et B. Mais comme ces foyers sont très rapprochés, la courbe se confond sensiblement avec ses asymptotes, et peut être considérée comme une ligne droite. L'équation de l'asymptote est $x = \frac{A}{B}\, y$, en apppelant y la distance de l'écran A'B' à la fente, et x la distance au point P, de la frange considérée. Or, on a $2A = m\,\frac{1}{2}\lambda$, et en appelant 2C la largeur AB de la fente, $B^2 = C^2 - A^2 = C^2 - \frac{1}{16}\,m^2\lambda^2$; ou $B^2 = C^2$, en négligeant le terme en λ^2. L'équation de l'asymptote devient alors

$$x = \pm \frac{m}{2C}\,\frac{1}{2}\,\lambda\, y. \qquad [1]$$

m est impair pour les franges brillantes, et pair pour les franges obscures. On voit que les franges sont également distantes ; car on a, pour les milieux de deux franges voisines, $x' - x = \pm \frac{\lambda}{2C}\, y$. L'intervalle entre les franges est proportionnel à leur distance y à la fente, et en raison inverse de sa largeur C. Si donc la fente allait en se rétrécissant d'une extrémité à l'autre, les franges seraient obliques et iraient en s'écartant du côté de l'extrémité la plus étroite. Ce résultat se vérifie avec la fiche D (*fig.* 1659).

La distance $x' - x$ des franges est proportionnelle à λ. Ces franges sont donc plus serrées avec la lumière violette qu'avec les autres couleurs ; c'est pourquoi la lumière blanche donne des franges irisées.

2° **Franges extérieures.** — Ces franges ne changent pas d'aspect comme les franges intérieures, avec la distance de l'écran ; c'est qu'elles sont produites par une portion d'onde AB dont le pôle est intercepté. Pour les expliquer, remarquons que tout point N pour lequel la différence NB—NA sera égale à un nombre *impair* de fois $\frac{1}{2}\lambda$, sera le lieu d'une bande lumineuse, et que si la différence est d'un nombre *pair*, il y aura obscurité. — Les franges extérieures forment des hyperboles, dont les foyers sont A et B et qui se confon-

dent sensiblement avec leurs asymptotes; elles sont soumises aux mêmes lois que les franges intérieures, et l'équation [1] s'y applique exactement. Les franges extérieures perdent rapidement leur netteté quand on s'éloigne du bord de l'ombre géométrique, et elles disparaissent quand la fente est trop large pour que les rayons partis du point B soient sensibles en A' (2261). Il faut donc, pour qu'il y ait à la fois des franges extérieures et intérieures, que la fente ne soit ni trop large ni trop étroite.

Les divers résultats qui précèdent se vérifient par l'expérience. MM. Biot et Pouillet les avaient découverts par l'observation, avant que la théorie ne les eût fait connaître.

On obtient des franges très brillantes pouvant être projetées sur un écran éloigné, en appliquant sur une fente de 1cm de largeur, une lentille cylindrique très peu convergente, au foyer de laquelle on place l'écran. — Au lieu d'une fente, on peut employer un miroir étroit incliné à 45°, sur lequel les rayons se réfléchissent comme s'ils partaient de l'image symétrique du trait lumineux On se sert alors de la fiche T (*fig.* 1659).

2264. Franges produites par deux fentes très étroites et très rapprochées. — Ce cas n'est autre chose que l'expérience de Grimaldi et Young (2221). La trajectoire des franges est une hyperbole dont les foyers sont aux fentes. Une lame transparente très mince placée sur l'une de ces fentes déplace les franges de son côté. — Nous avons vu (1,519) que M. Despretz a obtenu, avec les ondes sonores, un résultat analogue à celui qui nous occupe ici.

2265. Franges produites par un écran très étroit. — Supposons que l'écran AB (*fig.* 1661), au lieu d'être indéfini, soit assez étroit pour que la lumière venant de ses deux bords, dépasse le milieu de l'ombre géométrique; les rayons agiront les uns sur les autres, et il en résultera des franges intérieures à l'ombre, indépendamment de celles qui se forment à l'extérieur. De plus, ces dernières seront modifiées, car il parvient aux points où elles se forment, de la lumière venant du côté opposé de l'écran étroit, et qui se mêle à celle qui les forme. En effet, si l'on masque un des bords avec un écran, on voit ces franges changer sensiblement d'aspect, en même temps que les franges intérieures disparaissent.

Explication des franges intérieures. — Quand l'écran AB (*fig.* 1664), n'est pas trop étroit, ces franges diffèrent très peu de celles qui seraient fournies par deux fentes placées en A et B à la place des bords de l'écran; ce qui tient à ce que la lumière envoyée par les arcs élémentaires qui touchent l'un et l'autre bord, détermine le sens de l'action produite à une certaine distance (2261). Mais il n'en est plus ainsi quand l'écran est très étroit, et que les franges sont observées à une distance assez grande de AB pour qu'elles soient très rapprochées des franges extérieures. Si l'on considère d'abord le milieu P de l'ombre géométrique, on voit que ce point recevra les ondulations concordantes émanant des deux parties libres A*d*, B*d'* de l'onde. Il y aura

donc en P une frange brillante, dont l'éclat différera d'autant moins de celui que donnerait la surface entière de l'onde, que l'écran sera plus étroit. Si donc on plaçait l'œil en P, on apercevrait un trait lumineux, comme si l'écran AB était fendu dans toute sa longueur. Considérons maintenant le point *n*, pris dans l'ombre géométrique; la lumière qu'il reçoit est produite par la résultante des actions émanant des différents points de la partie d'onde A*d*, combinée avec la résultante qui correspond à la partie B*d'*. Partageons l'arc A*d* en éléments d'interférence A*a*, *ab*, *bc*... Si l'arc A*a* était seul, l'effet qu'il produirait sur l'éther en *n*, pourrait être remplacé par celui d'une onde unique, ou *onde résultante*, partant d'un point *o* tel que l'on ait $on - An = an - on = \frac{1}{4}\lambda$. Cependant les actions des divers points de l'arc A*a*, allant en diminuant à mesure que ces points sont plus éloignés du pôle qui correspond au point *n*, on voit que le centre de l'onde résultante sera un peu plus rapproché du point A que du point *a*. L'arc A*a* n'étant pas seul mais étant suivi des arcs *ab*, *bc*.... qui en détruisent en partie l'effet (2261), surtout pour les points les plus éloignés du pôle, on voit que le centre de l'onde résultante sera encore plus rapproché de A, et d'autant plus que l'arc A*a* sera plus éloigné du pôle. Les centres des ondes résultantes étant supposés en *o* et *o'*, on voit qu'il y aura une frange brillante en *n*, si la différence $o'n - on$ est égale à un nombre pair de fois $\frac{1}{4}\lambda$, et une frange obscure si ce nombre est impair. La trajectoire sera une hyperbole ayant un foyer en *o* et *o'*. Mais ces foyers seront différents pour les franges des différents ordres, puisque les centres des ondes résultantes changent de position dans les arcs A*a*, B*a'*, et que ces arcs eux-mêmes changent de grandeur, avec les distances des bords A et B au pôle du point *n*.

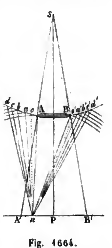


Fig. 1664.

On voit que les franges sont d'autant plus espacées que AB est plus petit : car, pour obtenir une même différence de marche dans les rayons *o'n*, *on*, il faut que le point *n* soit d'autant plus éloigné de P, que AB est plus petit. Cela se vérifie facilement au moyen de la fiche K (*fig.* 1659), dans laquelle une aiguille forme l'écran étroit; on voit les franges s'étaler beaucoup plus, du côté de la pointe que du côté le plus épais. Si, quand l'écran n'est pas très mince, les franges se confondent avec celles que produiraient deux fentes étroites placées en A et B, c'est qu'alors les distances *o*A et *o'*B sont insensibles par rapport à AB. Fresnel, puis M. Quet, ont retrouvé par le calcul tous ces résultats, qui se vérifient aussi par l'expérience.

II. Diffraction par des ouvertures ou des écrans dont toutes les dimensions sont très petites.

2266. Nous avons supposé, dans ce qui précéde, que les bords rectilignes des écrans ou des fentes étaient assez étendus pour que leurs extrémités n'aient pas d'influence sur la partie des franges que l'on observe. Il suffit alors de chercher les effets des points de la surface d'onde cylindrique situés dans une section droite, et nous avons vu comment on parvient, en suivant la méthode synthétique de Fresnel, à expliquer toutes les circonstances générales des phénoménes. Mais quand les ouvertures ou les écrans sont trés petits dans tous les sens, la théorie est beaucoup plus compliquée ; il faut tenir compte des actions produites par les ébranlements partis de tous les points de la surface libre de l'onde, et, à défaut de la méthode synthétique qui ne peut plus s'appliquer, il faut employer l'analyse mathématique, qui conduit toujours à des résultats d'accord avec les observations. Parmi les géomètres qui ont fait des recherches étendues sur ce sujet, il faut citer particuliérement M. Schwerd. Prenant pour point de départ la méthode analytique de Fresnel, il l'a développée et appliquée à un grand nombre de cas variés, parmi lesquels nous citerons ceux d'une petite ouverture ayant la forme d'un cercle, d'un trapéze, d'un parallélogramme, d'un carré, d'un triangle. Ne pouvant développer ici ces savants calculs, nous nous contenterons de décrire quelques-uns des résultats fournis par l'expérience.

2267. Anneaux produits par une ouverture ou un écran circulaires. — Quand des rayons émanant d'un point lumineux passent par un petit trou circulaire, on obtient à une certaine distance, des anneaux irisés ou franges circulaires ; les unes dans l'image géométrique de l'ouverture, les autres en dehors de cette image, et analogues aux franges linéaires formées par une fente étroite. Fraunbofer a trouvé que les diamétres des anneaux sont en raison inverse du diamètre du trou, et qu'ils sont équidistants ; seulement la distance du centre au premier anneau est moindre que la distance de deux anneaux consécutifs. En appelant r, r', r''... les rayons des anneaux, et D le diamétre du trou, on a

$$r = \frac{0^{mm},00054}{D}; \quad r' = 1 \quad \frac{0^{mm},00065}{D} + r; \quad r'' = 2 \quad \frac{0^{mm},00065}{D} + r'; \ldots$$

Au centre, il y a un point brillant ou un point noir, suivant la distance de l'écran au trou, ou suivant la grandeur de ce dernier ; et les anneaux intérieurs ou extérieurs peuvent disparaître, suivant ces dimensions.

Écran circulaire. — Dans le cas d'un disque circulaire très petit, on obtient aussi des franges circulaires analogues aux franges linéaires produites par un écran allongé très étroit. Un résultat curieux, indiqué par le calcul,

c'est que, pour certaines distances, le centre de l'ombre doit être aussi éclairé que si le disque n'existait pas. Cette conséquence des formules de Fresnel a été signalée par Poisson et vérifiée par Arago, au moyen d'un disque de 2mm de diamètre ; ce disque semblait percé à son centre. Le point brillant central forme une tache d'autant plus étendue que le disque est plus petit.

Ouverture annulaire. — Fraunhofer a examiné le cas d'une ouverture annulaire très petite, qu'il obtenait au moyen d'une pointe de compas découpant plusieurs feuilles d'or superposées sur une lame de verre. Il obtint ainsi des anneaux irisés tout-à-fait semblables à ceux que donne une ouverture circulaire ; seulement, dans les valeurs de r', r''..., D représente la largeur de la fente circulaire, et la valeur de r est modifiée. Si l'on recouvre avec un écran, une partie de l'ouverture au plus égale à la moitié, il n'y a de changé que l'éclat des anneaux. Mais si l'écran couvre plus de la moitié, les anneaux ne se montrent qu'au-dessous de la partie découverte et dans l'espace angulaire opposé. On conclut de là que chaque élément de l'anneau se comporte comme une portion de fente produisant des franges disposées symétriquement de chaque côté dans le sens du rayon, et qui se superposent quand elles proviennent de deux éléments opposés. On voit pourquoi les anneaux sont complets tant qu'il reste plus de la moitié de l'ouverture.



Fig. 1665.

Pour faire ces diverses expériences, on forme le point lumineux, soit au moyen d'une lentille circulaire à très court foyer, soit au moyen d'un très petit trou pratiqué dans une plaque de métal, et laissant passer les rayons solaires. La lumière tombe sur une seconde plaque percée d'une ouverture annulaire ou circulaire B (*fig.* 1659), ou sur un petit disque de métal fixé à une lame de verre, L. On voit en B le support destiné à recevoir ces fiches. Ce support peut être déplacé transversalement à la règle du banc de diffraction par la vis de rappel U. On peut aussi élever ou abaisser la fiche, au moyen d'une vis x, agissant sur un levier coudé o, qui la soulève plus ou moins. Ces deux mouvements sont destinés à *centrer* le disque ou l'ouverture circulaire, par rapport au point lumineux.

2268. Ouverture rectangulaire. — Une ouverture rectangulaire très petite donne deux séries de franges dirigées perpendiculairement aux côtés, et dont les distances sont en raison inverse de la largeur de l'ouverture dans la direction de chaque série (*fig.* 1665). Les choses se passent donc à peu près comme si l'on employait deux fentes perpendiculaires l'une à l'autre. Mais, en outre, on aperçoit dans les angles que forment les deux séries de franges, une multitude de petits spectres distribués régulièrement.

2269. Cas de deux ouvertures circulaires. — Chacune des ouvertures donne des anneaux comme si elle était seule ; mais si elles sont assez rapprochées pour que ces anneaux se superposent, il se forme, par l'action mutuelle

des rayons partis des deux ouvertures, des franges très serrées *ab* (*fig.* 1666) droites et perpendiculaires à la ligne des centres; et, en outre, deux systèmes de franges obliques *mm*, *nn*. Si l'on bouche un des trous, les franges disparaissent. C'est là l'expérience de Grimaldi, par laquelle il a découvert que de la lumière ajoutée à de la lumière, peut donner de l'obscurité. Quand les deux trous sont inégaux, les franges obliques disparaissent, et les franges perpendiculaires, *ab*, se courbent en forme de branches d'hyperbole ayant l'ouverture la plus grande pour foyer.

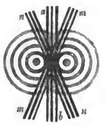
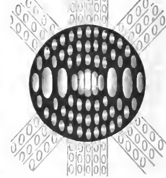


Fig. 1666.


Fig. 1667.

La *figure* 1667 représente, d'après Fraunhofer, le résultat donné par la lumière reçue dans une lunette après avoir traversé deux trous circulaires de $0^{mm},555$ de diamètre, dont les centres sont distants de $0^{mm},972$. Les bandes verticales et obliques correspondent évidemment aux franges droites de la *figure* 1666. Quand on augmente le nombre des trous, les spectres deviennent de plus en plus brillants et purs.

2270. Apparences au foyer des fortes lunettes. [1]. — W. Herschel a remarqué que, si l'on regarde une étoile, par un ciel bien pur, à travers une lunette grossissant au moins 200 fois, l'étoile apparaît comme un très petit disque à contour bien tranché, entouré d'anneaux alternativement noirs et brillants, très serrés équidistants et sur les bords desquels on distingue, avec beaucoup d'attention, une légère coloration. Le disque central est d'autant plus large que l'étoile est plus brillante. Si un léger nuage vient à la voiler, son image se réduit à un point. Quand on observe une étoile double, on remarque aussi que la plus faible du système présente un disque plus étroit que l'autre. Pour expliquer ces phénomènes, il faut remarquer que, si les rayons qui se réunissent sur l'axe de la lunette pour donner l'image de l'étoile n'ont pas éprouvé de différence de marche, ceux qui aboutissent en des points plus éloignés du foyer, latéralement, seront, suivant la distance, en discordance ou en concordance; ce qui produira les alternatives de lumière et d'obscurité qui forment les anneaux. Si l'on entrevoit ainsi la cause du phénomène, on n'en explique pas toutes les particularités; par exemple, on ne voit pas pourquoi le disque apparent est d'autant plus grand que l'étoile est plus

[1] *Traité de la lumière*, par J. Herschel, traduction française, t. I, p. 501.

brillante. On ne peut attribuer cet effet à l'irradiation; car, dans ce cas, le disque empiéterait sur les premiers anneaux, ce qui n'a pas lieu.

Effets des diaphragmes. — M. J. Herschel ayant placé en avant de l'objectif de la lunette dirigée vers une étoile, des diaphragmes de diverses formes, a observé des effets très curieux, dûs évidemment à la diffraction des rayons qui rasent les bords des ouvertures de ces diaphragmes, et à la convergence que l'objectif leur imprime. Ces phénomènes peuvent être variés indéfiniment; nous allons en citer quelques exemples.

Diaphragme à ouverture circulaire ou annulaire. — Quand l'objectif est rétréci par un diaphragme à ouverture circulaire, l'image de l'étoile s'agrandit, et d'autant plus que l'ouverture est plus petite. Cette image ressemble à celle d'une planète, et est entourée d'anneaux colorés, dans lesquels le violet est en dedans. Quand l'ouverture est très petite, de $12^{mm},5$ par

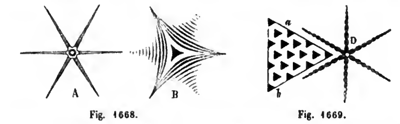


Fig. 1668. Fig. 1669.

exemple, les anneaux pâlissent, ne sont plus distincts, et les contours de l'image, très agrandie, sont très diffus.

Arago a remarqué que si l'on enfonce ou qu'on retire peu à peu l'oculaire, de la lunette, l'image de l'étoile présente à son centre une tache alternativement noire et lumineuse. Il y a là analogie avec ce qui se passe quand on emploie une petite ouverture circulaire (2266), et nous avons vu le parti qu'on a tiré de ce résultat pour la construction d'un scintillomètre (2242).

Les ouvertures annulaires produisent des effets analogues très brillants et très réguliers. Quand on rétrécit la fente circulaire, l'épaisseur des anneaux colorés diminue, ainsi que le diamètre de l'image centrale, qui finit par se réduire à un point pendant que les anneaux se confondent, après s'être tellement multipliés qu'on ne peut les compter. Les diamètres des anneaux et de l'image centrale ont paru à M. J. Herschel, en général, proportionnels à $(r'-r)$; r en représentant par r' et r les rayons extérieur et intérieur de la fente circulaire.

Indépendamment de ces anneaux très rapprochés, on en voit d'autres beaucoup plus grands, ressemblant à des halos, mais très faibles; ils sont bien plus distincts quand on emploie deux fentes circulaires concentriques.

Trois ouvertures circulaires dont les centres sont au sommet d'un triangle équilatéral, donnent un disque brillant auquel sont tangents 6 disques de même grandeur, mais d'un éclat plus faible. Le tout est entouré de larges

anneaux semblables à des halos. Si les trois ouvertures circulaires sont remplacées par trois ouvertures angulaires égales, les résultats sont les mêmes que s'il n'y en avait qu'une. Mais si l'on vient à enfoncer ou retirer peu à peu l'oculaire, on distingue trois systèmes d'anneaux correspondant aux trois ouvertures, et qui se séparent de plus en plus.

Diaphragme à ouverture triangulaire, etc. — Lorsque l'ouverture présente la forme d'un triangle équilatéral, on voit un petit disque brillant entouré d'un anneau noir, d'où partent 6 rayons minces, brillants, à bords bien nets (*fig.* 1668), et correspondants aux angles et aux milieux des côtés de l'ouverture. Les rayons paraissent identiques, mais ils ne le sont qu'en apparence; car, si l'oculaire n'est pas au point, l'image prend l'aspect B; on voit que trois des rayons sont formés de stries longitudinales, et les trois autres de stries transversales. Une fente formant un triangle, donne les mêmes résultats.

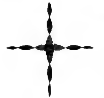


Fig. 1670.

Un diaphragme percé de petits trous triangulaires régulièrement arrangés, comme en *ab* (*fig.* 1669), produit une sorte d'étoile à 6 rayons formés d'ovales lumineux entourés d'un anneau plus ou moins coloré. Au centre, est un disque brillant incolore.

Une fente figurant un carré, au lieu de donner 8 rayons, comme on aurait pu le penser, n'en donne que 4, qui sont composés de taches alternativement brillantes et sombres (*fig.* 1670). La première tache de chaque rayon est irisée transversalement; les couleurs des autres sont peu distinctes.

§ 2. — RÉSEAUX.

2271. Quand la lumière, au lieu de traverser une ou deux ouvertures très petites, en traverse un grand nombre très rapprochées et régulièrement distribuées, il se produit des phénomènes de diffraction très remarquables qui ont été découverts par Fraunhofer. Un semblable système d'ouvertures porte, en optique, le nom de *réseau*. Quand les réseaux sont formés de lignes parallèles alternativement opaques et transparentes, ils forment les *réseaux parallèles*, dont nous allons d'abord nous occuper.

Fraunhofer formait des réseaux, au moyen de deux vis égales fixées parallèlement, entre lesquelles il tendait un grand nombre de fois un fil très fin, dont les tours étaient séparés par l'épaisseur très petite du pas. Il employa ensuite une feuille d'or collée sur une lame de verre, et dans laquelle il traçait des raies équidistantes; puis il pratiqua, au diamant, sur une lame de verre, des traits opaques qui laissaient entre eux des espaces transparents. C'est presque toujours ainsi qu'on fait aujourd'hui les réseaux, au moyen de la machine à diviser. Quelquefois les traits sont pratiqués dans une mince couche de vernis, puis on attaque le verre partout où le vernis a été enlevé, au moyen des vapeurs d'acide fluorhydrique. Quand on veut une grande régularité, il

faut se contenter de 300 divisions par millimétre ; il suffit, du reste, qu'il y en ait au moins 38, pour que les phénoménes se manifestent complétement.

2272. Effets des réseaux parallèles. — Quand on regarde un trait lumineux à travers un réseau dont les stries lui sont paralléles, on aperçoit le trait lumineux de la même manière qu'à l'œil nu, sauf qu'il est un peu affaibli, et l'on voit de part et d'autre, un espace obscur N, N (*fig.* 1671), suivi d'un spectre *s*, *s*, dont le violet est en dedans, et dont les couleurs sont tellement pures, qu'on y distingue facilement les principales raies. Vient ensuite un nouvel espace obscur *n*, *n*, plus étroit que le premier, suivi de plusieurs



Fig. 1671.

spectres de plus en plus étalés, mais empiétant de plus en plus les uns sur les autres, de manière que les couleurs pâlissent et finissent par disparaître. Ces spectres peuvent être séparés au moyen d'un prisme, et alors on y distingue aussi des raies. Si l'on opère avec de la lumière simple, on obtient des bandes isolées, de la couleur de la lumière employée, et qui ne sont que les portions correspondantes des spectres. — Ces phénomènes peuvent s'observer en projetant la lumière qui a traversé le réseau sur un écran placé à une certaine distance.

On a fait des réseaux dont les stries sont disposées circulairement autour d'un même centre. Si l'on regarde un point lumineux à travers ce système, les bandes noires et les spectres successifs présentent la forme de larges et beaux anneaux.

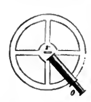


Fig. 1672.

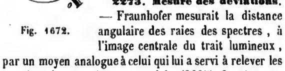


Fig. 1673.

2273. Mesure des déviations. — Fraunhofer mesurait la distance angulaire des raies des spectres, à l'image centrale du trait lumineux, par un moyen analogue à celui qui lui a servi à relever les positions des raies du spectre solaire (2035). Le réseau, *r* (*fig.* 1672), était fixé au centre d'un cercle gradué portant une lunette à réticule, dont l'objectif était tout près du centre, et dont l'oculaire *o* pouvait en parcourir la circonférence.

M. Babinet a employé une méthode très précise et beaucoup plus simple : on regarde à travers le réseau placé en *o* (*fig.* 1673), deux fentes parallèles, pouvant s'écarter plus ou moins l'une de l'autre. On voit alors deux systèmes de spectres *ec*, *c'e'*, qui se superposent en partie, mais qu'on peut distinguer l'un de l'autre en plaçant une des fentes un peu plus haut que l'autre. On fait

en sorte, en écartant plus ou moins les fentes, ou éloignant plus ou moins le réseau, que la raie *a*, dont on veut avoir la déviation et qui appartient à un spectre formé à droite par la fente *e*, coïncide avec la même raie *a'* du spectre du même ordre formé à gauche par la fente *e'*. L'angle *eoc* est alors égal au double de la déviation cherchée D = *aoe*, et le triangle rectangle *aeo* donne tang D = *ae* : *ao*, d'où D = ½*ec* : *ao* en prenant l'angle pour la *tangente*. On déduit donc la déviation, de l'espace *ec* qui sépare les fentes et de leur distance *ao* au réseau. On voit en *ff* le système des fentes, pouvant s'écarter plus ou moins, et que l'on ajuste dans un des supports du banc de diffraction (2223).

2274. Lois de Fraunhofer. — 1° Les milieux des spectres successifs sont équidistants, ou, ce qni revient au même, les déviations de ces milieux sont entre elles comme la série des nombres entiers 1, 2, 3, 4....

2° Les longueurs des spectres successifs, ou les distances entre deux de lenrs raies de même nom, sont entre elles comme les mêmes uombres.

3° La différence d'épaisseur des traits transparents et opaques n'a pas d'influence sur l'étendue et la position des spectres ; elle modifie seulement leur éclat.

4° L'étendue des spectres dépend de la somme d'un espace opaque ajouté à un espace transparent, somme que l'on appelle un *élément* du réseau. La déviation d'une même raie est en raison inverse de la distance entre deux éléments, ou proportionnelle au nombre d'éléments compris dans un millimétre. Quand il y en a 100, le premier spectre a l'étendue de celui que donne un prisme de flint de 60° ; de plus, les couleurs occupent des espaces sensiblement égaux, de manière qu'on a un *spectre normal*, à couleurs très pures, et auquel on peut comparer les spectres à couleurs inégalement distribuées, donnés par les prismes.

Les lois qui précédent sont renfermées dans la formule D = *mk*N, dans laquelle D est la déviation d'une raie prise dans le spectre d'ordre *m*, N le nombre d'éléments du réseau par millimétre, et *k* un coefficient constant qui dépend de la couleur dans laquelle se trouve la raie considérée.

2275. Explication des effets des réseaux. — Le système des ondulations, aidé de l'analyse mathématique, rend bien compte des phénoménes que produisent les réseaux. Nous allons employer ici une méthode synthétique, due à M. Babinet [1]. Soit A*e* (*fig.* 1674) la surface du réseau ; *a*, *b*, *c*, *d*, *e*... les parties opaques. Supposons l'œil placé en C, et le trait lumineux, sur la droite C*s* perpendiculaire à A*e*, à une distance assez grande pour que tous les rayons qui tombent sur le réseau puissent être regardés comme parallèles, et pour que la surface de l'onde passant par le point A, puisse être supposée confondue avec A*e*. Si le réseau était enlevé, on verrait le trait lumineux dans la direction C*s* et, dans toute autre direction, on ne verrait aucune lumiére, les éléments d'interférence se détruisant deux à deux (2261). La présence du réseau n'empêchera pas de voir le trait ; seulement, son éclat pourra être

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XL, p. 166.

affaibli par les parties opaques, et l'obscurité régnera toujours de part et d'autre du trait. Mais si l'on s'éloigne à une distance Ad, telle qu'une raie opaque couvre précisément l'élément de l'onde qui détruirait l'élément précédent, il y aura lumière dans la direction Cd, à une distance d'autant plus grande que l'œil sera plus éloigné du réseau. Soit, par exemple, ACd un angle tel que l'on ait $dC - oC = oC - cC = \frac{1}{2}\lambda$ du violet. Les ébranlements envoyés au point C par l'élément co ne seront plus détruits par l'élément od, et il viendra de la lumière violette dans la direction oC, lumière d'autant plus brillante que le bord de l'espace opaque sera plus rapproché du point o.

Pour calculer la déviation $d\text{CA} = d$, décrivons l'arc cr ayant son centre en C ; le triangle dcr donne $dr = \lambda = \overline{cd} \sin d$. Si nous supposons que cd soit compris N fois dans un millimètre, on a $1^{mm} = \text{N} \cdot \overline{cd}$, et l'équation précédente devient $\sin d = \text{N}\,\lambda$; ou, en prenant l'angle pour le sinus, $d = \text{N}\,\lambda$, qui n'est autre chose que la formule des réseaux dans le cas du premier spectre (2274). On voit que la déviation est indépendante de la différence entre les espaces opaques et transparents, et que la constante k n'est autre chose que la longueur d'ondulation qui correspond à la couleur considérée. — Pour les autres couleurs, on aura $d' = \text{N}\,\lambda'$, $d'' = \text{N}\,\lambda''$..., λ' étant plus grand que λ ; λ'' plus grand que λ', etc. ; les couleurs apparaîtront donc les unes à la suite des autres, à des distances angulaires du point A sensiblement proportionnelles à λ, λ', λ''.

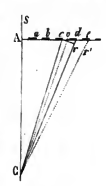


Fig. 1674.

Considérons actuellement un autre élément de réseau, situé à une distance du point A telle que la différence $d\text{C} - c\text{C}$ soit égale à 2λ, ou, en général, à $m\lambda$, m étant un nombre entier. On pourra diviser l'intervalle en $2m$ éléments d'interférence correspondants à des différences de distance au point C égales à $\frac{1}{2}\lambda$, et ces éléments étant en nombre impair, les actions produites par leurs différents points s'entre-détruiraient deux à deux s'il n'y avait pas de partie opaque. Mais si nous supposons que les parties opaques recouvrent un *nombre impair d'éléments*, de manière qu'il en reste aussi un nombre impair de libres, il y en aura un de ces derniers qui conservera toute son action, et l'on aura de la lumière dans la direction correspondante. Le triangle cdr donnerait alors $d = m\lambda\text{N}$, qui est la formule générale de Fraunhofer.

Il reste à voir pourquoi la lumière d'une couleur donnée manque entre la bande lumineuse qui correspond à la différence de distance $m\lambda$ du point o, et celle qui correspond à la différence $(m + 1)\,\lambda$. Or, on peut considérer, sur le réseau, entre les stries qui correspondent à ces deux bandes, deux zones dans lesquelles les différences de distance au point o vont en augmentant, de $m\lambda$ à $m\lambda + \frac{1}{2}\lambda$; puis, de cette dernière à $(m+1)\,\lambda = m\lambda + 2\,\frac{1}{2}\,\lambda$. Les rayons envoyés par les points correspondants de ces deux zones seront en différence de marche de $\frac{1}{2}\lambda$, et s'entre-détruiront en arrivant au point o. Il y

aura donc obscurité dans la direction de ces zones. Quand on emploiera la lumière blanche, les couleurs, en se juxtaposant, feront disparaître les bandes obscures, sauf les deux premières de chaque côté.

Nous avons supposé que les rayons incidents arrivent au réseau parallèlement les uns aux autres. Si ces rayons partaient d'un point peu éloigné, l'explication serait la même, seulement il faudrait tenir compte des différences de marche des rayons obliques voisins, au moment où ils rencontrent le réseau.

2276. Remarques. — 1° Il résulte de l'explication des couleurs qui forment les différents spectres, sauf le premier, que, si la partie opaque recouvrait un nombre pair des éléments d'interférence compris dans un intervalle opaque et transparent, les éléments à découvert seraient aussi en nombre pair, et s'entre-détruiraient deux à deux ; de manière que le spectre correspondant manquerait. Si nous désignons par $n : n'$ le rapport entre les espaces obscur et transparent, le spectre d'ordre $m = n + n'$ manquera, ou sera très faible ; car on pourra diviser l'intervalle considéré en deux parties contenant, l'une $2n$, l'autre $2n'$ éléments d'interférence sensiblement égaux. Les premiers étant seuls libres, s'entre-détruiront deux à deux. Par exemple, si $n = n' = 1$, le second spectre manquera ; si $n = 1$, $n' = 3$, le spectre d'ordre $m = 1 + 3 = 4$ manquera. C'est ce que Fraunhofer a vérifié par l'expérience.

2° La formule $\sin d = m\mathrm{N}\lambda$ montre que si $\mathrm{N}\lambda$ est plus grand que 1, c'est-à-dire si $1 : \mathrm{N}$ ou un *élément* du réseau est moindre que λ, $\sin d$ sera plus grand que 1 ; et il ne pourra y avoir de spectres ; et, en effet, les réseaux à stries trop serrées n'en donnent plus.

3° Si l'on opérait dans un autre milieu que l'air, en appelant l la longueur d'ondulation du violet dans ce nouveau milieu, on aurait $d_1 = \mathrm{N}l$, égalité qui, combinée avec $d = \mathrm{N}\lambda$, donne $d_1 : d = l : \lambda = n$; les déviations sont donc entre elles comme les indices de réfraction n et 1 de l'air et du milieu. C'est ce que Fraunhofer a trouvé par l'expérience, en plaçant la fente et le réseau aux deux extrémités d'un tube plein de liquide.

4° Mesure de λ. — La formule $\sin d = \mathrm{N}\lambda$ donne le moyen de mesurer les longueurs d'ondulation correspondantes aux raies du spectre, ce qu'on ne peut faire avec les franges d'interférence, dans lesquelles ces raies ne sont pas distinctes. C'est par ce moyen que M. Babinet a obtenu les valeurs de λ consignées dans le tableau ci-dessus (2225). — Masson a reconnu que la lumière électrique donne, avec les réseaux, des spectres à raies brillantes, comme avec les prismes. On pourra donc mesurer les longueurs d'ondulation correspondantes aux raies de cette sorte de lumière.

2277. Réseaux irréguliers. — Fraunhofer a fait de nombreuses expériences avec des réseaux à intervalles inégaux. Quand l'irrégularité est complète, toutes les couleurs se mêlent, et le réseau ne produit qu'une traînée blanchâtre perpendiculaire aux stries. Mais si les irrégularités sont soumises à une certaine loi, et se reproduisent périodiquement, les spectres se montrent encore, et leur déviation est donnée par la formule $\sin d = m\lambda : \mathrm{L}$, dans

laquelle L représente l'espace dans lequel se trouvent réparties les stries formant une période. Les spectres successifs diffèrent alors beaucoup en intensité ; il en est de très pâles qui, placés à côté d'autres très brillants sur lesquels ils se superposent en partie, n'en altèrent pas sensiblement les couleurs, ce qui permet de distinguer dans les spectres d'ordre élevé, des raies que la superposition des spectres ne permet pas de distinguer avec un réseau régulier. — Quand on rapproche les paupières, de manière que les cils forment un réseau devant l'œil, on aperçoit ordinairement, en regardant une bougie, une lueur horizontale blanchâtre, les cils étant généralement inégalement espacés; mais il arrive assez souvent qu'on aperçoit des spectres dont les couleurs sont assez distinctes.

2278. Réseaux à mailles carrées, circulaires, etc. — Fraunhofer a fait beaucoup d'expériences avec des réseaux formés de petites ouvertures égales de différentes formes, et régulièrement distribuées. On peut former un réseau à mailles carrées, au moyen de deux réseaux parallèles croisés; avec un morceau de mousseline ou de ruban. Ces sortes de réseaux donnent une multitude de petits spectres, les uns disposés suivant les bras d'une croix parallèles aux côtés des carrés, les autres distribués obliquement dans les quatre angles droits. Le phénomène est des plus brillants, et son aspect varie avec la grandeur des mailles et la distance au point lumineux.

2279. Réseaux par réflexion. — Quand la lumière se réfléchit sur des stries alternativement polies et ternes, elle produit les mêmes effets que les réseaux. Cela se conçoit facilement, les rayons réfléchis étant dans le même cas que s'ils partaient de l'image symétrique du point lumineux, par rapport au plan du réseau; aussi Fraunhofer a-t-il obtenu des résultats identiques, sauf l'intensité, au moyen de rayons réfléchis, ou de rayons transmis, par un réseau formé en pratiquant des stries dans une feuille d'or appliquée sur une lame de verre. L'explication des effets des réseaux traversés par la lumière, s'applique donc aux réseaux agissant par réflexion.

Les couleurs irisées que présente la nacre sont produites par des stries très fines provenant de sa structure feuilletée. En effet, M. Brewster ayant appliqué sur de la nacre polie, du mastic, de la cire noire, ou un alliage fusible, la substance a pris l'empreinte des stries, et a produit par réflexion les mêmes couleurs; sauf l'intensité, qui dépend évidemment du pouvoir réflecteur. Le gypse à structure fibreuse présente aussi des couleurs qui s'expliquent de la même manière. Les plumes de certains oiseaux doivent leurs brillantes couleurs à des effets de réseaux, produits par des filaments très fins qui les composent. Un métal à demi-poli peut présenter aussi des couleurs irisées à cause des stries parallèles produites par la poudre dure qui a servi à le polir, quand elles ne sont pas trop serrées (2276). Comme ces stries sont rarement régulières, on n'obtient le plus souvent qu'une lueur blanchâtre, aux points qui envoient des rayons réfléchis [illegible]s l'œil. On a fabriqué, en Angleterre, des boutons d'habits en métal, sur lesquels étaient tracées des stries ou de

petites figures très régulières obtenues par la compression d'un coin d'acier finement gravé. Ces boutons, connus sous le nom de *boutons Barthon*, réfléchissent les couleurs les plus brillantes, quands ils sont éclairés par le soleil ou par des bougies.

2280. Passage des phénomènes de diffraction ordinaire à ceux des réseaux. — C'est en étudiant les phénomènes produits par de petites ouvertures de plus en plus nombreuses, que Fraunhofer a été conduit à considérer les réseaux. M. Schwerd a suivi une marche semblable, dans quelques-unes de ses recherches analytiques, et il a trouvé les résultats que l'expérience avait fournis, et en a signalé d'autres qui avaient passé inaperçus et qu'il a ensuite vérifiés. C'est ainsi qu'une théorie vraie éclaire l'expérience, qui, à son tour, lui sert de contrôle et la confirme.

Fraunhofer nomme spectres de *première classe*, les spectres, ou franges irisées, donnés par une seule fente, dont nous avons parlé plus haut (2263). Avec deux fentes, ces spectres sont accompagnés des franges intérieures (2264), qu'il nomme spectres *imparfaits de deuxième classe*, parce qu'on n'y distingue pas de raies. Avec trois fentes, d'autres spectres, dits de *troisième classe*, se montrent entre ceux de seconde classe ; et si l'on augmente le nombre des fentes, il ne se forme plus de nouvelles classes de spectres, mais ceux qui existent déjà se modifient.

Fraunhofer annonce que, si l'on augmente de plus en plus le nombre des fentes, les spectres de deuxième classe ne changent que peu de position, pendant que ceux de troisième classe se resserrent en se rapprochant de la bande centrale, avec laquelle ils finissent par se confondre, et qu'ils s'épurent de manière qu'on finit par y distinguer les raies. De nombreuses mesures lui ont appris que leurs largeurs sont en raison inverse du nombre de fentes libres d'un même réseau, et, pour des réseaux différents, en raison inverse de la largeur de leurs éléments. N étant le nombre d'éléments par millimètre, m le rang du spectre, et ν le nombre de fentes, on a, en général, $d = 0^{mm},000528 \frac{m}{N\nu}$. Quand les spectres de troisième ordre se confondent avec la bande centrale, il y a un espace noir entre cette bande et les premiers spectres du deuxième ordre. M. Schwerd trouve par le calcul que, en effet, les spectres de deuxième classe ne changent pas de place quand le nombre de fentes augmente. Il trouve, de plus, que les spectres de troisième classe ne se confondent pas avec la bande centrale, mais se resserrent tellement qu'ils semblent former une lumière continue. Il reconnaît aussi qu'il y a des spectres de troisième classe entre deux spectres de deuxième classe consécutifs quelconques, mais de moins en moins nets à mesure qu'on s'éloigne de la bande centrale, et il est parvenu à les distinguer par l'expérience. Les bandes noires NN, *nn* (*fig.* 1671) contiennent de ces spectres de troisième classe, mais très faibles, ce qui fait qu'ils avaient échappé à l'observation.

§ 3. — DES MÉTÉORES DÉPENDANT DE LA DIFFRACTION.

2281. Explication des arcs-en-ciel surnuméraires. — Nous avons vu (2118) en quoi consistent les arcs-en-ciel *surnuméraires*, nommés aussi *secondaires* ou *supplémentaires*. Il est à remarquer qu'on ne les voit que dans les parties culminantes des arcs ordinaires, et seulement quand ils sont très élevés ; on n'en voit pas de traces près de l'horizon.

Voici comment on explique ces arcs surnuméraires, au moyen de la diffraction : Indépendamment des faisceaux efficaces qui forment l'arc-en-ciel ordinaire, il existe une multitude de rayons qui, deux à deux, émergent aussi parallèlement, l'un entrant *au-dessus* du faisceau efficace, l'autre *au-dessous*. Pour concevoir ce résultat, considérons le rayon incident *ai* (*fig.* 1675), donnant le rayon réfracté *inr* tangent en *n* à la diacaustique *cnn'* (1979), se réfléchissant en *r*, et émergeant en *e*. Menons par le point *r* une seconde tangente *i'rn'* à la courbe. Le rayon incident *a'i'* donnant un rayon *i'r* qui se réfléchit en *r*, fournira un rayon émergent *e'* parallèle à *e*. Les déviations égales des rayons *aire*, *a'i're'*, sont moindres que 41° qui correspond au faisceau efficace *sbd*, et n'en diffèrent que peu. Par exemple, pour une incidence de 70°, la déviation est $d = 38°\ 12'$, et l'autre rayon, qui éprouve la même déviation, tombe sous l'incidence de 56° 45'. Les deux rayons *e*, *e'* ont éprouvé dans la goutte d'eau une certaine différence de marche l'un par rapport à l'autre, puisqu'ils n'ont pas traversé la même épaisseur de liquide ; ils pourront donc interférer. Si donc on regarde, à travers une lame de verre de couleur simple, dans une direction formant avec la droite qui passe par l'œil et par le centre du soleil, un angle égal à la déviation *d*, on observera de la lumière ou de l'obscurité, suivant que la différence de marche correspondante sera égale à un nombre pair ou à un nombre impair de fois $\frac{1}{2}\lambda$. Cette direction sera un peu au-dessous de celle suivant laquelle on reçoit les rayons efficaces du premier arc-en-ciel, et, en descendant encore au-dessous, on trouvera des alternatives d'obscurité et de lumière formant des franges d'autant plus écartées, que les gouttes d'eau seront plus petites ; la déviation devant changer d'autant plus pour obtenir une même différence de marche, que ces gouttes sont plus petites. La différence de marche devant aussi être plus grande pour les rayons rouges que pour les rayons violets, on voit que, dans chaque frange, le rouge sera au-dessous.

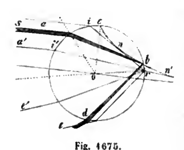


Fig. 1675.

Il résulte de ce qui précède, que les arcs surnuméraires ne seront suffisam-

ment écartés pour être distincts, que lorsqu'il y aura un très grand nombre de gouttes de pluie très petites et sensiblement égales. Les arcs surnuméraires ne s'observant qu'à une certaine hauteur, il faut en conclure que les gouttes d'eau cessent, en s'approchant du sol, de remplir les conditions d'interférence efficace ; soit parce qu'elles deviennent trop grosses, soit parce qu'elles cessent d'être égales, en se réunissant en partie les unes aux autres ; soit enfin parce que les agitations irrégulières de l'air près de la surface de la terre altèrent leur forme sphérique.

Les arcs surnuméraires qui accompagnent très rarement en dessus l'arc-en-ciel extérieur, s'expliquent d'une manière analogue, au moyen des rayons qui émergent deux à deux parallélement, aprés avoir éprouvé deux réflexions.

On peut observer, comme l'a fait M. Babinet, les couleurs des arcs surnuméraires, dans un filet d'eau cylindrique de 1^{mm} de diamètre. On distingue, auprès des couleurs qui correspondent au premier arc-en-ciel, 16 franges intérieures, et, auprès de celles du second arc, 8 à 9 franges extérieures. Les distances angulaires de ces franges, aux couleurs principales, permettent de calculer le diamètre du cylindre. Nous ajouterons que M. Airy a développé par l'analyse la théorie des arcs surnuméraires, et que M. Miller a vérifié les formules, sur un filet cylindrique d'eau frappé par les rayons solaires.

2282. DES COURONNES. — Quand de légers nuages passent devant le soleil ou la lune, on aperçoit souvent autour de l'astre un ou plusieurs cercles colorés connus sous le nom de *couronnes*. Ces cercles sont équidistants, mais leur diamètre angulaire n'a rien de constant, ce qui empêche de les confondre avec des halos. Le diamètre du premier cercle peut varier de 1° à 4°. Souvent l'éclat de l'astre empêche de distinguer les couronnes ; il suffit alors, pour les voir apparaître, de cacher le soleil avec un petit écran circulaire, ou d'observer son image par réflexion dans l'eau. Les couronnes sont produites par les petits globules d'eau interposés entre l'astre et notre œil. On les imite parfaitement au moyen de poussières à *grains réguliers*, et pour en trouver l'explication, il faut commencer par chercher celle des cercles irisés produits ainsi artificiellement. C'est ce que nous allons faire.

2283. Cercles colorés produits par des corpuscules. — Si comme l'a fait Young, on projette sur une lame de verre, du lycopode, de la poussière de lycoperdon ou de la carie du blé, les globules du sang, en général des corps en grains fins dont le plus grand nombre soient égaux, on observe, quand on regarde à travers cette lame la flamme d'une bougie, trois ou quatre anneaux irisés ayant le violet en dedans, et séparés par des intervalles égaux ; on peut aussi les voir par réflexion. On obtient encore des couronnes au moyen de poils très fins, comme ceux du lièvre, groupés confusément entre deux lames de verre. On peut encore en obtenir au moyen du verre dépoli, et de l'espèce de rosée déposée par l'haleine sur une lame de verre. Une poussière fine, mais à grains inégaux, comme toutes les poussières inorganiques, ne donne pas de couronnes. Quelquefois, quand on regarde la flamme d'une bougie, peu

d'instants après s'être réveillé, on la voit entourée de beaux anneaux irisés; ils sont dûs à des stries de la conjonctive, ou à des globules du sang dont elle est injectée

M. Delezenne a constaté que les distances entre les anneaux produits par les poudres fines, suivent les même lois que les distances entre les spectres formés par les réseaux parallèles, et que les anneaux ont d'autant plus d'éclat que les grains sont plus serrés et plus près d'être exactement égaux. Antérieurement, Fraunhofer, ayant disposé irrégulièrement entre deux lames de verre, de petits disques égaux, avait trouvé que les diamètres d'un même anneau brillant sont proportionnels aux longueurs d'ondulation de la lumière employée, et *en raison inverse du diamètre des disques*. Un fait important, c'est que la grandeur des anneaux ne change pas avec la distribution des disques ou des corpuscules, et ne dépend pas comme pour les réseaux, de la somme d'un intervalle opaque et d'un intervalle transparent.

Ériomètre d'Young. — Le rapport entre le diamètre des anneaux et la grosseur des corpuscules a fourni à Young le moyen de comparer les grosseurs des filaments de diverses sortes de laine, en prenant le rapport entre les diamètres des anneaux formés par les flocons placés entre deux lames de verre, à travers lesquelles on regarde un point lumineux. On compare de la même manière les poussières organiques, les grains de fécule, etc. Par exemple, on trouve que la poussière de la carie du blé donne des anneaux doubles de ceux de la poudre du lycoperdon cervinum; et, en effet, des mesures microscopiques ont donné 0^{mm},014 pour le diamètre des grains de la carie, et 0^{mm},028 pour le lycoperdon.



Fig. 1676.

L'instrument destiné à cet usage porte le nom d'*ériomètre*; il est représenté dans la *figure* 1676. *ca* est une règle divisée, P la plaque sur laquelle est déposée la poussière à examiner. L'œil est appliqué à une petite ouverture *o* pratiquée dans un écran fixe. En A est un écran portant une ou plusieurs séries circulaires de trous, et une longue fente à travers laquelle on aperçoit une partie de tous les anneaux formés par la poudre, quand on regarde un point lumineux placé derrière la plaque P. On fait glisser l'écran A sur la règle *ac*, de manière qu'un anneau d'un même ordre coïncide dans tous les cas avec une même série de trous, opération facilitée par la fente. Les diamètres angulaires des anneaux sont alors entre eux comme les distances de l'écran A à l'ouverture *o*.

2284. De la théorie des anneaux produits par les corpuscules. — Newton a fait beaucoup de tentatives pour expliquer ces anneaux, dans le système de l'émission. Fraunhofer pensait que chaque corpuscule formait séparément un système d'anneaux (2266), et que ces anneaux superposés formaient ceux qu'on observe; mais, entre autres difficultés, cela suppose que chaque

corpuscule se comporte comme s'il était isolé, et les phénomènes des réseaux nous ont montré qu'il n'en peut être ainsi. Plus tard, on a voulu assimiler les lames couvertes de poussière, à des réseaux circulaires, et comme les résultats sont indépendants de l'arrangement de ces corpuscules, on avait cherché à prouver, au moyen du microscope, que plusieurs d'entre eux étaient ordinairement juxtaposés, de manière à laisser entre eux un espace de grandeur constante, et à constituer un élément de réseau ; mais cela ne peut s'appliquer au cas de filaments groupés confusément. On doit à M. Babinet le principe sur lequel repose l'explication du phénoméne.

Principe de M. Babinet[1]. — Si l'on place un trés petit corps opaque tout près de la ligne qui joint un point lumineux à l'œil, ce petit corps produira le même effet qu'une ouverture égale laissant passer la lumière incidente. Pour se rendre compte de ce résultat, en apparence paradoxal, il faut se rappeler que toutes les parties d'une onde sphérique, qui ne sont pas tout près de la droite qui joint l'œil au point lumineux, s'entre-détruisent mutuellement (2261). Or, le corps opaque interceptant une partie de l'onde qui concourt à cette destruction, les effets émanant des points voisins de ce corps ne sont plus détruits, la lumière apparaît dans sa direction, et ce corpuscule produit autant d'illumination qu'il semblait devoir en éteindre.

Ce principe est aussi, comme nous l'avons vu, une conséquence du calcul (2267). Il a servi à M. Babinet à expliquer le fait suivant, observé par M. Necker, à Genéve : le soleil se levant derrière une colline couverte de broussailles, l'observateur placé dans l'ombre de la colline, un peu au-dessous des rayons solaires qui passaient par dessus sa tête, voyait de petites branches se projeter sur le ciel en lignes brillantes, et non en lignes noires, comme si elles avaient été d'argent mat. C'est aussi par le même principe qu'on explique les couleurs des fils d'araignée, et des corpuscules flottant dans l'air traversé par les rayons solaires.

Recherches de M. Verdet. — Le principe de M. Babinet ne donne pas immédiatement la théorie des anneaux engendrés par les poussières, car les grains n'étant pas isolés, mais trés rapprochés les uns des autres, leurs effets doivent se modifier mutuellement. M. Verdet a traité la question à ce point de vue, et l'a résolue de la manière suivante[2] : Il résulte du principe, que la surface d'onde, coïncidant avec le plan des corpuscules, peut être remplacée par une surface opaque munie d'ouvertures ayant la même forme et la même position que ces corpuscules. Si nous imaginons un cylindre oblique ayant pour base la pupille, ou l'objectif d'une lunette, ce cylindre interceptera sur la surface de l'onde, un espace égal à la pupille ou à l'objectif, et tous les corpuscules contenus dans cet espace enverront des rayons qui se réuniront en un point de la rétine, ou au point focal de la lunette. Là, il se produira un effet

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. IV, p. 342.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 129.

résultant, qui dépendra de la différence de marche des rayons, due à leur obliquité par rapport à la surface de l'onde. Les cylindres ainsi construits dans différentes directions n'interceptent pas, il est vrai, les mêmes portions de cette surface, mais on peut néanmoins regarder ces portions comme identiques, à cause du grand nombre de particules qu'elles contiennent, et le problème revient à déterminer comment varie l'intensité de la lumière envoyée dans différentes directions par une portion limitée d'onde plane recouverte de corpuscules circulaires égaux, distribués sans ordre régulier, et produisant le même effet que de petites ouvertures circulaires. Le calcul donne pour l'expression de l'intensité, la formule à laquelle on arrive dans le cas d'une seule petite ouverture circulaire ; d'où résulte l'identité des anneaux produits par une seule ouverture, et ceux que produiraient une multitude d'ouvertures remplaçant les grains de poussière. Il n'y a de différence que sous le rapport de l'éclat, qui est plus faible avec une seule ouverture.

M. Verdet a vérifié par l'expérience la loi des diamètres des anneaux. Il a aussi contrôlé le principe qui lui a servi de point de départ, en produisant des anneaux au moyen d'un grand nombre de petits trous circulaires égaux, pratiqués dans une lame métallique, et irrégulièrement espacés.

2285. Explication des couronnes. — La théorie qui précède s'applique aux *couronnes* qu'on observe autour du soleil ou de la lune voilés par de légers nuages. Ici, les corpuscules sont formés par les gouttelettes d'eau. Les cirrus, composés de particules de glace, ne donnent pas de couronnes.

Stéphanomètre. — On peut déduire la grosseur des gouttelettes, du diamètre angulaire du premier anneau. M. Delezenne a imaginé pour cela un petit instrument : au fond d'un tube se trouvent plusieurs verres colorés qui ne laissent passer qu'une seule couleur, le bleu ou le rouge par exemple, et qui affaiblissent la lumière du soleil, de manière qu'on peut distinguer des couronnes dans une foule de cas où l'éclat de l'astre empêche de les voir à l'œil nu. C'est pourquoi l'instrument se nomme *stéphanoscope*. Pour en faire un *stéphanomètre*, il suffit de recouvrir une partie du verre, de poudre de lycopode. On voit alors, en même temps, les couronnes produites par cette poussière et celles que produisent les nuages ; de manière qu'on peut comparer leurs diamètres, qui sont en raison inverse des grosseurs des corpuscules qui les engendrent. On a trouvé par ce moyen que les globules d'eau des brouillards sont généralement plus gros en hiver qu'en été. Voici quelques résultats obtenus par M. Kaemtz dans l'Allemagne centrale et en Suisse.

Janvier,	*février,*	*mars,*	*avril,*	*mai,*	*juin,*
$0^{mm},0275$	0,0350	0,02	0,0192	0,0156	0,018
juillet,	*août,*	*septembre,*	*octobre,*	*novembre,*	*décembre.*
$0^{mm},0169$	0,014	0,0224	0,0203	0,0245	0,0349

2286. Cercle d'Ulloa, arc-en-ciel blanc, etc. — Les phénoménes que nous allons décrire se montrent à l'opposé du soleil quand il est très bas, sur des nuages ou des brouillards situés à une petite distance de l'observateur, qui doit être placé sur un lieu élevé. On aperçoit d'abord sur le brouillard, son ombre, souvent assez nette pour qu'on y distingue la tête, les bras, les jambes. La tête paraît ensuite entourée de plusieurs couronnes irisées équidistantes, quelquefois trés brillantes, dont le violct est en dedans, et leur diamétre angulaire n'est pas constant; c'est ce qu'on désigne sous les noms d'*ombres frangées*, *gloires*, *couronnes antisolaires*, et quelquefois *anthélies*. A une grande distance, se montre quelquefois un dernier anneau blanchâtre, nommé *cercle d'Ulloa*, ou *arc-en-ciel blanc*, dont le diamétre angulaire, mesuré par différents observateurs, paraît varier de 37° à 42°. Bouguer et Ulloa, témoins de ce phénoméne pendant leur séjour sur le Pichincha, en ont donné la première description détaillée. Le cercle d'Ulloa est assez rare et souvent le phénomène est réduit à l'ombre de l'observateur. C'est ce qui a lieu sur le Brocken, en Hanovre, où ce phénoméne constitue le fameux *spectre du Brocken*, dont la fréquence avait sans doute concouru à établir la célébrité superstitieuse attachée à cette montagne, du temps des anciens Saxons.

Les ombres frangées sont attribuées à des couronnes se formant autour du soleil, et dont les rayons, au lieu de tomber dans l'œil de l'observateur, sont reçus sur les particules du brouillard, comme sur un écran, et s'y réfléchissent de manière à revenir à l'observateur, qui tourne le dos au soleil. La faculté des brouillards de réfléchir ainsi la lumière, est attestée par l'illumination qu'ils présentent dans nos rues, autour des becs de gaz, et par les ombres à trois dimensions formées par les montants des lanternes qui les protégent. M. Babinet a fait quelques observations qui confirment cette explication : il a vu sur de la poudre de guerre étendue au soleil, l'ombre de sa tête entourée de couronnes irisées; il a observé, dans les Landes, des couronnes sur des brouillards trés rapprochés; il en a vu se former sur des particules en suspension dans l'eau de certaines riviéres. Les ombres frangées ont été observées fréquemment dans les régions boréales, ct elles sont alors trés brillantes; ce qui peut s'expliquer par le trés grand pouvoir réflecteur des brouillards glacés sur lesquels viendraient se réfléchir les couronnes formées par le passage des rayons solaires à travers des nuages formés de particules aqueuses.

Quant à l'*arc-en-ciel blanc*, il n'a pas encore été complétement expliqué. M. Bravais en a donné une théorie mathématique, mais dans laquelle il suppose que les nuages sont composés de globules creux; ce qui ne peut être admis (II, 1172). Nous pensons que l'arc-en-ciel blanc n'est autre chose qu'un arc-en-ciel ordinaire, dont les couleurs sont extrêmement pâles, à cause de la petitesse des gouttelettes d'eau qui le produisent. On a, en effet, observé des arcs-en-ciel formés dans les conditions ordinaires, et dont les couleurs n'étaient pas distinctes. Mariotte en cite plusieurs exemples, et il remarque qu'ils se

forment dans des brouillards épais. Cette explication supposerait que le diamètre du cercle d'Ulloa est constant et égal à 41° environ. Or, c'est ce qu'on peut admettre ; car les mesures données par divers observateurs varient de 37° à 42°, quand elles ont été prises par des moyens susceptibles de précision. Or, la diffusion des contours ne permet guère d'arriver à une grande exactitude, et des mesures prises sur un même cercle ont donné des différences tout aussi grandes. Par exemple, M. Bravais a trouvé, sur le Faulhorn, 37° 49′ pour le demi-diamètre horizontal du cercle d'Ulloa, 39° 19′ un quart d'heure après, et 38° 44′ une heure après. Ajoutons qu'il a remarqué une légère teinte rouge à l'extérieur. M. Kaemtz a distingué du bleu en dedans et du rouge en dehors. Enfin, M. Scoresby a aperçu un cercle entourant une *gloire*, et présentant des couleurs très faibles; un second cercle plus grand enveloppait le premier. Il n'hésite pas à regarder ces deux cercles, comme les arcs-en-ciel ordinaires intérieur et extérieur; malheureusement, il ne donne pas leur diamètre angulaire.

CHAPITRE VIII.

ANNEAUX COLORÉS.

§ 1 — ANNEAUX COLORÉS DANS LES LAMES MINCES.

2287. Couleurs produites par les lames minces. — Quand la lumière tombe sur une lame très mince, les rayons réfléchis présentent des couleurs vives, qui dépendent de l'épaisseur de la lame, et de la substance dont elle est formée. Des lames minces de mica, de verre soufflé au point d'éclater, la couche d'oxyde qui se forme sur l'acier recuit, celle qu'on dépose sur les métaux par la galvanoplastie, les couleurs de Nobili (III, 1560), la surface du verre altérée par l'humidité, les ailes membraneuses de certains insectes, etc., nous présentent des exemples de ce phénomène. Ces couleurs se montrent encore dans les fissures du verre fêlé, entre deux plaques de verre pressées l'une contre l'autre, dans les couches minces de vernis, dans l'huile, l'éther en couche imperceptible sur l'eau. Les eaux stagnantes contenant des matières animales, se recouvrent parfois d'une pellicule grasse irisée. Des bulles d'eau de savon présentent de semblables couleurs quand elles sont très minces, et l'on y reconnaît l'influence de l'épaisseur. En effet, si l'on

reconvre la bulle, d'une cloche de verre destinée à la préserver des agitations, on distingue à sa surface, des bandes horizontales colorées, dont la couleur change, à mesure que l'épaisseur diminue par l'action de la pesanteur qui entraîne le liquide vers les parties inférieures. Bientôt une tache noire apparaît au sommet, et la bulle éclate. Si elle est éclairée avec de la lumière simple, les bandes irisées sont remplacées par des bandes alternativement noires et brillantes qui descendent peu à peu, à mesure que l'épaisseur diminue.

Ces expériences se font très commodément avec un liquide visqueux à la glycérine, imaginé par M. Plateau, et qui donne des bulles persistant plusieurs heures, et même, avec certaines précautions, pendant plusieurs jours. Voici un des moyens de le préparer : on dissout à une douce chaleur 1 de savon de Marseille dans 40 d'eau distillée en poids ; on filtre après refroidissement ; on mêle 3 volumes de ce liquide avec 1 de glycérine pure de Londres ; on agite ; et 24 heures après on filtre à travers de bon papier; puis on ajoute encore 1 volume de glycérine. Ce liquide peut se conserver pendant un an [1].

Les lames minces incolores impriment aussi des couleurs à la lumière transmise; seulement ces couleurs sont, en général, moins vives que celles qui sont produites par réflexion.

Boyle paraît être le premier qui ait écrit sur les couleurs des lames minces ; il parle du verre soufflé, des couleurs de l'acier recuit, des bulles formées avec divers liquides. Hoocke, dans sa *Micrographie*, cite beaucoup d'expériences sur ce sujet ; il constate que la couleur est uniforme quand la lame mince a partout la même épaisseur, et que la couleur disparaît quand l'épaisseur est trop grande, ou quand elle est excessivement petite. Il s'avisa d'appliquer sur une lame de verre, une lentille à très long foyer et vit autour du point de contact, des anneaux irisés dans lesquels il remarqua que les couleurs sont disposées dans le même ordre que dans le premier arc-en-ciel.

[1] Nous saisissons cette occasion pour mentionner une nouvelle série de recherches sur les figures d'équilibre d'une masse liquide sans pesanteur (I, 138), publiée par M. Plateau, depuis l'impression de notre premier volume. M. Plateau est parvenu à former différentes figures d'équilibre au moyen de lames très minces d'huile en suspension dans l'alcool, et adhérant à des charpentes en fils métalliques, et il démontre que ces figures *laminaires* sont identiques avec les figures massives formées dans les mêmes circonstances. De là un moyen des plus ingénieux de former les figures d'équilibre dans l'air, au moyen de lames extrêmement minces du *liquide glycérique*, lames sur lesquelles l'action de la pesanteur peut être regardée comme insensible. En employant certaines précautions décrites dans le Mémoire, on obtient avec facilité des figures d'équilibre presque réduites à des surfaces mathématiques, parées des plus brillantes couleurs et persistant pendant plusieurs heures. On procède dans la plupart des cas, en soufflant avec une pipe une bulle sphérique que l'on fait adhérer aux arêtes de la charpente métallique préalablement mouillées avec le liquide glycérique (*Mém. de l'Acad. des sciences de Bruxelles*, t. XXXIII).

C'est aussi au moyen d'un système semblable, que Newton est parvenu à découvrir par l'expérience les lois de ces curieux phénomènes.

2288. Anneaux réfléchis, dans les lames minces. — Si l'on applique la face courbe d'une lentille plan-convexe à très long foyer, sur une glace bien plane, et qu'on reçoive dans une direction sensiblement normale aux faces planes, de la lumière *simple* réfléchie par ce système, on aperçoit une série d'anneaux, alternativement brillants et obscurs, de plus en plus serrés à mesure qu'on s'éloigne du centre, et finissant par disparaître à une certaine distance (*fig.* 1680). Quand il y a contact apparent, on voit au centre, une tache noire, et les anneaux qui l'entourent sont dits du premier, du second, du troisième... ordre. Si les deux surfaces s'écartent un peu, on voit les anneaux se rapprocher du centre et former les uns après les autres une tache centrale alternativement brillante et noire. Si l'on rapproche les surfaces par pression, les anneaux s'agrandissent, au contraire, et la tache centrale se montre aussi alternativement obscure et brillante, jusqu'à ce qu'il y ait contact; ce qu'on obtient en pressant fortement et faisant glisser les deux surfaces l'une sur l'autre. Ces phénomènes se manifestent, quelle que soit la nature du fluide interposé entre les deux verres; ils ont aussi lieu dans le vide, et les diamètres des anneaux d'un même ordre dépendent du milieu interposé et de la courbure des verres. Mais ils sont indépendants de la nature de ces verres quand ils sont formés avec la même substance.

Anneaux irisés. — Les diamètres des anneaux dépendent de la lumière simple employée; ils sont le plus petits avec la lumière violette. Vient-on à faire tomber successivement les différentes parties d'un spectre sur le système des verres, on voit les anneaux s'étendre quand on passe du violet au rouge. Si donc on se sert de lumière blanche, les anneaux seront *irisés*, et l'on obtiendra ainsi la décomposition de la lumière par les lames minces.

S'il n'y a pas contact au centre, et qu'on rapproche les surfaces par pression, les anneaux s'étendent et les couleurs se remplacent successivement au centre, jusqu'à ce qu'il y ait contact; alors la tache centrale est noire.

2289. Anneaux transmis. — Quand on regarde la lumière des nuées à travers le système des verres, on aperçoit encore des anneaux, mais moins apparents que par réflexion. Ces anneaux, irisés avec la lumière blanche, sont alternativement sombres et brillants avec la lumière simple, et l'on reconnaît en mesurant les diamètres, que les anneaux brillants transmis occupent la place des anneaux noirs vus par réflexion, et réciproquement. — Dans le cas des anneaux irisés, les couleurs qui se montrent au même point par transmission et par réflexion, sont complémentaires l'une de l'autre. Pour le prouver, Young et Arago placent les verres, perpendiculairement au milieu d'une feuille de papier uniformément éclairée, de manière que le système reçoive de la lumière des deux côtés; quelle que soit la position de l'œil, on ne distingue pas d'anneaux, ceux qui viennent des rayons transmis formant de la lumière blanche avec ceux que donnent les rayons réfléchis. Si l'on intercepte, au moyen

d'un écran noir, les rayons qui viennent d'un des côtés, l'un des systèmes d'anneaux ne se forme plus, et l'autre apparaît aussitôt. Ces expériences montrent aussi que les anneaux complémentaires ont la même intensité.

Application à la photométrie. — Arago a déduit de là, une méthode photométrique assez exacte. Les deux lumières que l'on veut comparer sont placées symétriquement de part et d'autre du système de verres, et l'on éloigne la plus vive jusqu'à ce que les anneaux disparaissent. Les intensités des lumières sont alors comme les carrés de leurs distances au centre des anneaux.

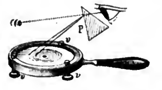


Fig. 1677.

2290. Manière d'observer les anneaux. — La *figure* 1677 représente le petit appareil imaginé par Hooke pour observer les anneaux formés dans les lames minces. Les deux verres sont pressés entre deux colliers, au moyen de vis *v*, *v*, *v*. Si l'on éclaire l'appareil avec la lampe monochromatique, on peut distinguer une quarantaine d'anneaux, tandis qu'on n'en voit que huit à dix avec la lumière du jour; ce qui tient à ce que les anneaux se serrant de plus en plus, les couleurs se mêlent et forment du blanc.

On peut voir un bien plus grand nombre d'anneaux avec la lumière blanche, en les observant, comme l'a fait Newton, à travers un prisme P. Les rayons violets étant plus relevés vers le sommet que les rayons rouges, se rapprochent de ces derniers de manière à produire un anneau étroit presque blanc séparé des anneaux voisins par un espace noir. Les couleurs sont à peine distinctes, mais les anneaux sont plus fins et bien plus nombreux. Il est évident que cela n'a lieu que dans la partie située au-delà du centre par rapport au prisme. Dans la partie opposée, au contraire, la réfraction du prisme écarte le rouge du violet dans chaque anneau, et la confusion est augmentée.

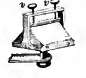


Fig. 1678.

Appareil à prisme. — Au lieu de regarder le système des deux verres à travers un prisme, on peut remplacer le verre supérieur par un prisme à angle droit P (*fig.* 1678), dont la face hypothénuse est appliquée sur une plaque de verre légèrement convexe. Le tout est fixé dans un cadre métallique, et deux vis *v*, *v'* servent à presser le prisme contre la plaque. Si l'on regarde dans une direction à peu près normale à l'une des faces latérales du prisme, on voit les rayons réfléchis, après être entrés par l'autre face, former de beaux anneaux minces et très nombreux. Si l'angle du prisme était plus grand que 90°, la réflexion totale réduirait beaucoup trop le champ dans lequel les anneaux peuvent être aperçus.

Quand on éclaire les plaques avec une flamme, et qu'on regarde très obliquement, on distingue plusieurs systèmes d'anneaux dont les centres sont situés dans le plan d'incidence. Ces anneaux, signalés par Dutour et par

Herschel, ne sont que les images de ceux qui sont formés dans la lame mince, réfléchis aux surfaces des plaques.

2281. Loi des diamètres des anneaux. — Newton a mesuré les diamètres des anneaux des différents ordres formés par de la lumière simple, quand il y a contact au centre. Il se servait d'un compas, et avait soin de prendre les diamètres perpendiculaires au plan de réflexion, afin d'éviter l'altération qu'apporte l'obliquité, comme nous le verrons, à la longueur des autres diamètres. Il plaçait l'œil, le plus près possible de l'axe de la lentille, et faisait correspondre les extrémités du compas aux points les plus brillants de chaque anneau. Il a reconnu ainsi les lois suivantes :

Les carrés des diamètres des anneaux brillants vus par réflexion, *sont entre eux comme la série des nombres impairs* 1, 3, 5.... ; *et les carrés des diamètres des anneaux obscurs, comme la série des nombres pairs* 0, 2, 4.... — Les anneaux brillants transmis occupant la place des anneaux obscurs réfléchis, *les carrés des diamètres des anneaux brillants* transmis *sont entre eux comme la série* 0, 2, 4.... ; *et les carrés des diamètres des anneaux obscurs, comme la série* 1, 3, 5....



Fig. 1679.

Dans la manière de procéder de Newton, les diamètres mesurés sont modifiés par la réfraction des rayons à travers le verre supérieur. Il est facile de voir que cette circonstance ne change rien aux lois. En effet, supposons l'œil (*fig.* 1679) très éloigné de la lentille, et soit ac la surface supérieure de la lame mince dans laquelle se forment les anneaux, cc' l'axe de la lentille, et $a'c'$, ac ses deux faces, que nous considérons comme parallèles entre elles, la courbure de la face inférieure étant insensible dans l'espace ac. Un rayon partant du point a d'un certain anneau, sera dévié à sa sortie de la lentille en a', de manière que le diamètre de l'anneau paraîtra être $a'c' = d'$, au lieu de $ac = d$. Cherchons le rapport entre ces deux diamètres. En menant la normale en a', on a $ac = d = cb + ba = d' + ba$. Or, le triangle $ba'a$ donne $\overline{ba} = \overline{ba'}$ tang $r = e \times i : n$, en appelant e l'épaisseur de la lentille, n son indice de réfraction, et prenant l'angle pour la tangente, parce que r et i sont très petits. On a en outre, dans le triangle $ic'a'$, $i = d' : l$, en désignant par l la distance ic'. Donc, $ba = ed' : nl$. Portant cette valeur dans celle de d, il vient $d = d'\left(1 + \frac{e}{nl}\right)$. La quantité entre parenthèses étant constante, on voit que les diamètres vrais sont entre eux comme les diamètres observés.

M. Babinet a imaginé un moyen ingénieux de mesurer les diamètres réels des anneaux. Il trace sur la glace inférieure, une division sur laquelle il applique la lentille, et il évalue le diamètre des anneaux en voyant sur quelle division ils se projettent. Comme les rayons qui partent des traits de division

subissent les mêmes déviations que ceux qu'envoient les anneaux, la mesure n'est pas altérée par la réfraction.

2292. Relation entre les diamètres et les épaisseurs. — La loi des diamètres peut s'exprimer autrement, en considérant les épaisseurs de la lame mince, épaisseurs qui sont liées géométriquement avec les diamètres. En effet, soit R le rayon de courbure de la surface convexe de la lentille, $r = oa$ (*fig.* 1680) le rayon d'un anneau, et e l'épaisseur $am = co$ de la couche mince, au point considéré de cet anneau. On aura, en abaissant mc perpendiculaire sur la normale oR au point de contact, $\overline{mo}^2 = 2R \times \overline{co} = 2R \cdot e$; et comme mo ne diffère pas sensiblement de mc, parce que R est très grand, on a $mc^2 = r^2 = 2R \cdot e$, d'où $e = r^2 : 2R$. L'épaisseur étant proportionnelle au carré de r, on voit qu'il résulte des lois ci-dessus (2291), que *les épaisseurs qui correspondent aux anneaux des divers ordres sont entre elles comme la série des nombres impairs, pour les anneaux brillants réfléchis; et comme la série des nombres pairs, pour les anneaux noirs*. C'est l'inverse pour les anneaux transmis.

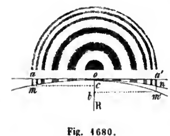


Fig. 1680.

Si la suface plane aa' était remplacée par une surface sphérique concave on, l'épaisseur en m' serait $m'n = e - e'$, en désignant par e et e' les distances $m'a'$, na'. Or, on a $e = r^2 : 2R$, et $e' = r^2 : 2R'$; d'où $m'n = e - e' = r^2 \left(\frac{1}{2R} - \frac{1}{2R'}\right)$; quantité proportionnelle à r^2. — Si la surface on était convexe vers cm', le signe (—) serait remplacé par le signe (+).

Les formules qui précèdent permettent de mesurer les épaisseurs excessivement petites qui correspondent aux anneaux des divers ordres, quand on connaît leur diamètre *vrai* (2291), et la valeur de R. Newton a trouvé ainsi, que les épaisseurs sont $0^{mm},0001611$ et $0^{mm},0001015$, au périmètre intérieur du premier anneau rouge et du premier anneau violet formés dans l'air.

2293. Largeur des anneaux. — Lentille conique — Newton a trouvé, par ce moyen d'évaluation des épaisseurs, que *la différence entre l'épaisseur au bord intérieur et au bord extérieur est la même dans tous les anneaux brillants ou noirs*; d'où il résulte, à cause de l'accroissement de plus en plus rapide des épaisseurs avec la distance au centre, que la largeur des bandes annulaires va en diminuant quand on s'éloigne du centre, et que, par conséquent, les anneaux sont de plus en plus serrés. Il résulte aussi de là que si, au lieu d'une lentille, on posait sur le verre plan un cône très aplati suivant l'axe, les anneaux seraient de même largeur et également espacés.

2294. Application à la théorie de la couleur des corps. — Newton a cherché à expliquer la coloration de la lumière réfléchie par les corps dépolis, par des effets de lames minces. Cette théorie peut se résumer ainsi : la

lumière pénètre toujours à une certaine profondeur au-dessous de la surface mathématique du corps. Là, une partie est réfléchie à la surface supérieure des molécules, ou des groupes moléculaires ; l'autre pénètre dans leur intérieur, est réfléchie à leur surface intérieure, et éprouve une coloration qui dépend de l'épaisseur de la couche traversée et du pouvoir réfringent de la substance. Newton a longuement développé cette théorie dans son *Traité d'optique*. Mais elle est sujette à plusieurs difficultés sérieuses : 1° On remarque que les couleurs des couches minces déposées à la surface des corps opaques, ont un aspect métallique que ne présentent pas les corps colorés ordinaires ; 2° on ne conçoit pas pourquoi les corps doivent être dépolis pour paraître colorés ; 3° les corps translucides devraient présenter, quand ils sont éclairés par derrière, la couleur complémentaire de celle qu'ils donnent par réflexion. — X. de Maistre a combattu la théorie de Newton, et lui en a substitué une autre dans laquelle il regarde la couleur des corps comme produite par l'absorption de certains rayons dans le passage à travers la couche superficielle, dans laquelle ils pénètrent avant de se réfléchir [1]. Il est bien probable qu'il en est ainsi pour certains corps; mais la nécessité de l'absence de poli, montre que l'explication qui s'appuie sur les interférences (2245) est celle qui convient au plus grand nombre de cas.

2295. Théorie des accès. — Après avoir découvert la loi des anneaux formés dans les lames minces, Newton a cherché l'explication de ces phénomènes dans le système de l'émission. Il est arrivé à les expliquer par une hypothèse célèbre, qui n'est que la traduction des lois des phénomènes, mais qui ne peut rendre compte de certains faits découverts depuis. Toutefois elle est trop remarquable et a occupé une trop grande place dans la science, pour que nous omettions d'en faire connaître les principaux traits.

Newton suppose que : 1° Les particules lumineuses acquièrent, en pénétrant dans un milieu réfringent, une disposition à se réfléchir facilement en arrivant à la surface d'un second milieu, ou à pénétrer facilement dans ce milieu. Ces dispositions se succèdent périodiquement, à des intervalles de temps égaux excessivement petits ; on les désigne sous les noms d'*accès de facile réflexion*, et *accès de facile transmission*. 2° Le passage d'un accès au suivant se fait d'une manière continue, et l'espace très petit parcouru par chaque particule dans son passage d'un accès au suivant, se nomme *longueur d'accès*. 3° La longueur d'accès n'est pas la même pour les rayons de différentes couleurs ; elle va en augmentant du violet au rouge.

Il résulte de ces hypothèses, que les rayons qui pénètrent dans la lame mince renfermée entre les deux verres de l'appareil de Hooke (2290), et qui se trouvent, en entrant, dans un accès de facile transmission, arriveront à la seconde surface de cette lame dans un accès de facile réflexion, et seront réfléchis, partout où l'épaisseur sera égale à une longueur d'accès, ou à un nombre

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Sciences et arts, 1831), XLVII, p. 17.

impair de longueurs d'accés; alors la particule se présentera de nouveau à la première surface dans un accès de facile transmission, et pourra sortir de la lame mince. Les épaisseurs correspondantes aux anneaux brillants réfléchis, ou aux anneaux noirs transmis, seront donc entre elles comme la série des nombres impairs. Partout où l'épaisseur sera moindre qu'une longueur d'accés ou égale à un nombre pair de longueurs d'accès, les particules lumineuses arriveront à la seconde surface dans un accés de facile transmission, passeront outre, et donneront des anneaux brillants transmis, et par conséquent des anneaux noirs par réflexion.

Pour expliquer les changements de diamétre des anneaux quand on les regarde obliquement, Newton suppose que les longueurs d'accès varient avec l'obliquité; et pour expliquer la relation qui existe entre les anneaux de même ordre formés entre les même verres avec des substances différentes interposées, il suppose que les longueurs d'accès varient dans les diverses substances, en raison inverse de leurs indices de réfraction; nouvelles hypothéses calquées sur les faits qu'il s'agit d'expliquer. Nous allons voir combien la théorie des ondulations l'emporte sur celle de l'émission dans l'explication de ces phénoménes, et avec quelle facilité elle en retrouve les lois.

2296. EXPLICATION DES ANNEAUX COLORÉS. — C'est à Young que l'on doit l'explication, dans le systéme des ondulations, des couleurs produites par les lames minces. Il a démontré que ces couleurs sont dues aux interférences des rayons réfléchis à la premiére et à la seconde surface de la lame mince, ou à celles des rayons transmis avec des rayons ayant éprouvé deux réflexions. Plus d'un siécle avant, Hooke s'était appuyé sur le principe des interférences, mais sans apporter de preuves, et ses ingénieuses déductions étaient restées dans l'oubli.

Principe d'Young. — Quand une ondulation rencontre la surface de séparation de deux milieux, il y a réflexion, et l'ondulation se propage en retour dans le milieu d'où elle vient. Si le second milieu est moins réfringent que le premier, le sens du mouvement de la molécule d'éther reste le même, et elle continue à parcourir sa phase sans changement de signe. Si, au contraire, le second milieu est plus réfringent que le premier, le sens du mouvement de l'éther change brusquement, de maniére que le rayon réfléchi se trouve dans le même cas que s'il avait éprouvé un retard égal à $\frac{1}{2}\lambda$.

Young avait déduit ce principe, de la considération de ce qui se passe quand une balle élastique A vient en choquer une autre en repos, B : si les balles ont la même masse, la balle choquée B prend la vitesse de A, qui reste à l'état de repos. Si la balle B présente moins de masse que A, celle-ci continue à se mouvoir dans le sens primitif, après avoir un peu perdu de sa vitesse. Si, au contraire, la masse de B est plus grande que celle de A, A revient sur ses pas ; il y a donc pour la balle choquante un changement dans le sens de la vitesse (I,473). Nous rappellerons encore que nous avons trouvé le même principe dans la réflexion du son (I,513) : la vitesse des molécules d'air en

vibration change de signe quand l'onde sonore rencontre un obstacle plus résistant que l'air, et conserve son même sens quand le second milieu résiste moins à la compression que le premier. Le principe d'Young a été, depuis, démontré par Poisson, au moyen de l'analyse mathématique.

2297. Explication des anneaux réfléchis vus perpendiculairement. — Supposons d'abord l'œil placé sur l'axe de la lentille avec laquelle sont produits les anneaux. Soit *mm* (*fig.* 1681) la lame mince, et *sa* un rayon de lumière simple *sensiblement perpendiculaire* à *mm*. Une partie de ce rayon se réfléchit en *a*, suivant *ar*, et l'autre pénétre en *c*, en donnant le rayon *a'r'* parallèle à *ar*, la lame mince ayant ses deux faces parallèles dans l'étendue trés petite *aa'*. Le rayon réfléchi *a'r* aura parcouru, de plus que le rayon réfléchi *r*, un espace *aca'* égal à $2e$; puisque nous supposons *sa* perpendiculaire à *mm*. Si nous supposons que la lame mince soit moins réfringente que les deux verres qui la contiennent, il y aura changement de signe dans le mouvement vibratoire, en *c*; c'est donc comme si le retard était augmenté de $\frac{1}{2}\lambda$. Le retard sera donc égal à $2e+\frac{1}{2}\lambda$. Les deux rayons *ar*, *a'r'* seront en concordance, quand cette somme sera égale à un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, ou quand on aura $2e+\frac{1}{2}\lambda=2m\,\frac{1}{2}\lambda$, ou $e=(2m-1)\,\frac{1}{4}\lambda$, c'est-à-dire pour des épaisseurs entre elles comme la série des nombres impairs. Si l'on a, au contraire, $2e+\frac{1}{2}\lambda=(2m+1)\frac{1}{2}\lambda$, ou $e=2m\frac{1}{4}\lambda$, il y aura discordance et obscurité, et les épaisseurs seront alors entre elles comme la série des nombres pairs. Si l'on fait $m=0$, d'où $e=0$, il y aura obscurité. La tache centrale est donc noire quand il y a contact. On voit, aussi, que les épaisseurs qui correspondent aux anneaux de même ordre sont proportionnelles à λ; les anneaux violets seront donc plus petits que les rouges. On retrouve donc ainsi toutes les lois données par l'expérience.

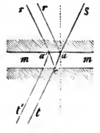


Fig. 1681.

Si la lame mince était plus dense que les milieux qui la limitent, le changement de signe dans le sens du mouvement vibratoire aurait lieu à la première réflexion seulement; la différence de marche serait $2e-\frac{1}{2}\lambda$, et les conséquences resteraient les mêmes. C'est ce qui a lieu quand on introduit de l'huile de cassia entre deux lentilles de crown.

2298. Anneaux réfléchis à centre blanc. — Quand il y a contact, on a une tache noire au centre. Si l'indice de réfraction de la lame mince était compris entre les indices du milieu supérieur et du milieu inférieur, les réflexions en *a* et en *c* (*fig.* 1681) se feraient dans les mêmes conditions; les deux rayons réfléchis éprouveraient donc en même temps ou n'éprouveraient pas, le changement de signe du mouvement vibratoire représentant une différence de marche égale à $\frac{1}{2}\lambda$; et la différence de marche serait simplement égale à $2e$. Il y aurait donc concordance dans les rayons, quand on aurait $2e=2m\,\frac{1}{2}\lambda$, ou $e=2m\frac{1}{4}\lambda$. Or, pour $m=0$, on a $e=0$; il y aurait donc

lumière au centre, où l'épaisseur est nulle. Ce fait curieux, inexplicable dans la théorie des accès, et signalé par Young comme une conséquence de la théorie des ondulations, a été vérifié par l'expérience, au moyen d'huile de sassafras, dont l'indice est égal à 1,53, engagée entre une lentille de crown et une plaque de flint, dont les indices sont 1,50 et 1,575. L'huile de gérofle, dont l'indice est 1,539, peut remplacer l'huile de sassafras.

2299. Explication des anneaux transmis. — Young explique les anneaux transmis, par les interférences des rayons passant directement, tel que *srt* (*fig.* 1681), avec une partie *t'* des mêmes rayons ayant éprouvé deux réflexions dans la lame mince, en *c* et *a'*. L'affaiblissement des rayons deux fois réfléchis explique pourquoi les anneaux transmis sont peu distincts. La différence de route des deux rayons *t*, *t'* est $2e$, les changements de signe qui peuvent avoir lieu aux deux réflexions, se compensant. Il y a donc concordance quand $2e$ contient un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, et discordance quand il en contient un nombre impair. Les anneaux brillants transmis occupent donc la place des anneaux noirs réfléchis, et, lors du contact, il y a une tache blanche au centre.

Remarques. — S'il n'y a pas contact entre les deux verres, la tache centrale sera brillante ou obscure, suivant l'épaisseur de la lame d'air. Remarquons aussi que le passage, des épaisseurs où il y a concordance complète à celles où il y a discordance, se faisant d'une manière continue, il y aura entre elles des épaisseurs pour lesquelles la discordance ou la concordance des rayons n'aura pas lieu complétement; ce qui nous explique pourquoi les anneaux brillants et snmbres, réfléchis ou transmis, se fondent les uns dans les autres, et ne sont pas terminés par des contours nets.

2300. Relation entre les indices de réfraction et les épaisseurs. — Les épaisseurs des lames minces de substances différentes, aux lieux où se forment des anneaux d'un même ordre, réfléchis ou transmis, sont *en raison inverse des indices de réfraction de ces substances*. En effet, si nous considérons l'anneau réfléchi brillant de m^e ordre, on a, pour une substance, $e=(2m+1)\frac{1}{4}\lambda$, λ étant la longueur d'ondulation de la lumière simple considérée, dans cette substance. Pour une autre substance, on aura $e'=(2m+1)\frac{1}{4}\lambda'$, d'où $e : e'=\lambda : \lambda'=n : n'$; n et n' étant les indices de réfraction des deux substances.

Newton avait découvert cette loi par l'expérience. On peut la vérifier, pour l'air et l'eau, de la manière suivante : on engage entre les deux verres qui produisent les anneaux, une goutte d'eau, qui pénétre entre eux par capillarité, en chassant l'air dans une partie de l'espace circulaire qui s'étend autour du point do contact. On remarque alors que le quatrième anneau dans l'air coïncide avec le cinquième dans l'eau. Or, les épaisseurs aux anneaux dans l'air, sont e, $3e$, $5e$, $7e$, $9e$...., et dans l'eau, e', $3e'$, $7e'$, $9e'$....; et, comme le quatrième anneau dans l'air se forme sous la même épaisseur que

le cinquième dans l'eau, on a $7e = 9e'$, d'où $e : e' = n' : n = \frac{7}{9}$; rapport égal à l'indice de l'eau par rapport à l'air.

Application. — La loi qui précède fournit un nouveau moyen de mesurer les indices de réfraction des liquides par rapport à l'air ; car, dans l'expression $e : e' = n : n'$, on peut remplacer le rapport des épaisseurs par celui des carrés des diamètres des anneaux de même ordre (2292), et on en tirera la valeur de n' en fonction de l'indice n de l'air. Ce moyen n'est pas très précis, à cause de l'incertitude qui règne sur le diamètre exact des anneaux.

2301. ANNEAUX VUS OBLIQUEMENT. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que l'œil était placé sur l'axe de la lentille qui sert à produire les anneaux. Quand on s'écarte de cette position, les anneaux réfléchis ou transmis s'agrandissent de plus en plus, *en restant soumis aux mêmes lois* ; seulement l'épaisseur de la lame mince correspondant à un anneau de même ordre, est d'autant plus grande que l'obliquité est plus prononcée. Newton a trouvé par l'expérience que, en appelant e, e' les épaisseurs d'un anneau du même ordre vu suivant la perpendiculaire ou suivant l'incidence i, on a, en supposant que la lame mince soit de même substance que le milieu qui entoure l'appareil, $e' = e : \cos i = e \times \sec i$. Mais Newton trouvait cette loi en défaut pour les incidences dépassant 60°, et il représentait alors l'épaisseur par la formule

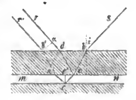


Fig. 1682.

$e' = e \cdot \sec u$, u étant un angle donné par la formule $\sin u = \frac{105 + n}{106} \sin i$,

dans laquelle n est l'indice de réfraction de la lame mince par rapport à la substance de la lentille. Nous allons voir que, sur ce dernier point, Newton s'était trompé (2303).

2302. Théorie des anneaux obliques. — Il nous suffira de considérer le cas des anneaux réfléchis. Soit mn (*fig.* 1682) la lame mince, dont nous supposons les faces parallèles dans l'étendue très petite où se font les réflexions d'un même rayon, et $b'b$ la surface supérieure de la lentille, parallèle à mn. Un rayon incident sb, faisant un angle i avec la normale en b, se réfléchira en partie en a, en donnant le rayon émergent dr ; l'autre partie pénétrera dans la lame mince, se réfléchira en c, et donnera le rayon émergent $b'r'$. Le chemin parcouru par une pulsation partant du point b, quand elle arrive à la surface $b'\alpha$, en suivant la route $bad\alpha$, et donnant le rayon émergent dr, est $2ba + d\alpha$. Dans le rayon réfléchi en c donnant le rayon émergent r', le chemin parcouru est $2ba + 2ac + \frac{1}{2}\lambda$; $\frac{1}{2}\lambda$ est ajouté, à cause du changement de signe qui se fait à la réflexion en c. La différence de marche est donc, en supprimant les parties communes, $2ac - d\alpha + \frac{1}{2}\lambda$. Le triangle rectangle $db'\alpha$ donne $d\alpha = db' \cdot \sin i$. Or, on a $db' = aa' = 2ac' = 2e'$ tang i, en appelant e' l'épaisseur cc' de la lame mince au point c ; on a donc $d\alpha = 2e' \cdot \sin i \cdot \text{tang}\, i =$

$2e' \sin^2 i : \cos i$. Quant à ca, il est égal, dans le triangle rectangle acc', à $e' : \cos i$. Remplaçant ca et $d\alpha$ par leur valeur, dans l'expression de la différence de marche, il vient $2ca - d\alpha + \frac{1}{2}\lambda = 2e' \cos i + \frac{1}{2}\lambda$. On voit déjà que, pour avoir une même différence de marche, c'est-à-dire des anneaux d'un même ordre, il faut que e' augmente en même temps que i.

Le retard correspondant à un anneau vu dans la direction normale est égale (2297) à $2e + \frac{1}{2}\lambda$, e étant l'épaisseur qui correspond à cet anneau. Si donc on veut qu'il soit de même ordre que celui qui est vu obliquement, il faut que la différence de marche soit la même, c'est-à-dire que l'on ait $2e' \cos i + \frac{1}{2}\lambda = 2e + \frac{1}{2}\lambda$, d'où $e' = e : \cos i = e \cdot \sec i$, formule à laquelle l'expérience avait conduit Newton.

2303. Généralité de la loi des sécantes. — La théorie indique que la formule qui précède s'applique à toutes les incidences, même aux plus grandes, contrairement à ce qu'avait trouvé Newton. Cette contradiction a été considérée pendant longtemps comme très grave, et M. J. Herschel y voyait une objection sérieuse au système des ondulations. Fresnel, pour lever la difficulté, allait jusqu'à admettre que la loi de Descartes était en défaut pour les passages très obliques des rayons entre deux surfaces très rapprochées. MM. de la Provostaye et P. Desains eurent l'idée de répéter les expériences de Newton; et ils reconnurent, par des mesures précises, que la loi des sécantes s'applique aux plus grandes incidences [1].

Voici comment ils ont procédé : le système de la plaque de verre et de la lentille plan-convexe était installé bien horizontalement sur un plateau en cuivre, que l'on pouvait déplacer dans le sens horizontal, au moyen d'une vis micrométrique. Les anneaux étaient observés au moyen de la lunette d'un cercle répétiteur perpendiculaire à la vis. Après avoir amené le point de croisement des fils du réticule de la lunette, au centre des anneaux, on faisait mouvoir le système des verres jusqu'à ce que le fil vertical coïncidât avec l'extrémité du diamètre de l'anneau dont on voulait obtenir le rayon. La vis micrométrique donnait alors le déplacement, et par conséquent le rayon, sans qu'il fût nécessaire de faire de corrections, parce que les rayons réfractés ne sont pas déviés dans le plan d'incidence, dans lequel se trouve toujours l'axe de la lunette. L'angle de cet axe avec la verticale donnait, d'autre part, l'angle d'émergence. Pour observer sous un autre angle, on éloignait plus ou moins le système des verres, parallèlement à la vis. La lumière, tamisée à travers une feuille de papier blanc huilé, était fournie par une lampe monochromatique à double courant d'air, mais sans cheminée. Dans le cas des grandes incidences, il fallait abaisser un écran assez près de la surface supérieure de la lentille, avant le point d'incidence, pour arrêter les rayons qui, réfléchis à cette première surface, empêchaient de distinguer les anneaux. La loi des diamètres des anneaux a été vérifiée, par cette méthode, avec une grande préci-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVII, p. 423.

sion, en allant jusqu'au 43e anneau, et la loi des sécantes, jusqu'à l'incidence de 86° 14', la plus grande qui ait permis de distinguer les anneaux. Ainsi s'est trouvée anéantie une difficulté qui déparait le bel ensemble que forme la théorie des ondulations.

§ 2. — COULEURS DANS LES LAMES ÉPAISSES.

2304. ANNEAUX PRODUITS PAR RÉFLEXION DIFFUSE. — Newton ayant fait tomber normalement sur un miroir sphérique concave en verre étamé *mm* (*fig.* 1683), un mince faisceau de rayons solaires passant par une petite ouverture placée au centre de courbure *o* de ce miroir, obtint autour de cette ouverture, une série d'anneaux irisés, ayant le violet en dedans comme dans les lames minces. Avec la lumière simple, ces anneaux étaient alternativement brillants et obscurs.

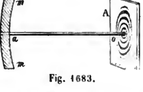


Fig. 1683.

Newton a reconnu que : 1° les diamètres de ces anneaux sont soumis aux mêmes lois que ceux des anneaux *transmis* formés par les lames minces ; 2° quand on emploie différentes lumières simples, les rapports entre ces diamètres sont aussi les mêmes qu'avec les lames minces ; 3° les diamètres des anneaux formés par des miroirs de même rayon et d'épaisseur différente, sont en raison inverse des racines carrées de ces épaisseurs. Ces lois ont été vérifiées avec soin par MM. Biot et Pouillet.

Si l'écran *ab* ne contient pas le centre du miroir, les anneaux sont moins brillants. Lorsqu'on incline peu à peu le miroir, de manière que l'image focale de l'ouverture de l'écran se forme latéralement au faisceau incident, le centre des anneaux se trouve au milieu de la droite qui joint l'ouverture à son image. Cette image, avec la lumière simple, est alternativement brillante et obscure, et elle passe par toutes les nuances du spectre quand on emploie la lumière blanche.

La lumière des anneaux est subordonnée à une condition qui avait échappé à Newton ; c'est que la surface antérieure du miroir ne doit pas être parfaitement nette. Les anneaux sont à peine visibles quand cette surface est bien polie et a été essuyée avec soin, tandis que si on la ternit avec le souffle de l'haleine, en y projetant de la poussière, ou en y passant une légère couche de vernis, ou d'eau blanchie avec un peu de lait qu'on laisse ensuite sécher, les anneaux présentent un éclat remarquable. D'un autre côté, si on enlève la couche de tain de la surface postérieure, les anneaux deviennent très faibles, et ils sont nuls avec un miroir métallique. Ces expériences prouvent que les anneaux sont produits par la combinaison des rayons réfléchis à la seconde

surface du miroir, avec les rayons *diffus* renvoyés par la première surface, dont on a terni l'éclat. Cela devient encore plus évident dans la manière d'opérer du duc de Chaulnes.

Anneaux du duc de Chaulnes. — Au lieu d'employer un miroir de verre, le duc de Chaulnes se servait d'un miroir métallique, devant lequel il plaçait parallélement une lame de verre un peu ternie *ab* (*fig.* 1684), ou une lame de mica, qui remplaçaient la surface antérieure du miroir de verre.

Fig. 1684.

Anneaux de M. Pouillet. — Au lieu d'une lame transparente, M. Pouillet place devant le miroir métallique un écran *n* (*fig.* 1686) percé d'une ouverture de *forme quelconque*, assez petite pour que ses bords rencontrent les rayons incidents et réfléchis sur le miroir. Un simple bord rectiligne placé devant le miroir, suffit même pour produire des anneaux; mais on ne distingue bien qu'une partie de leur circonférence.

2305. Anneaux vus dans l'air. — Les anneaux formés par la lumière diffuse peuvent être vus directement, sans venir se peindre sur un écran. M. Stokes prend le miroir sphérique en verre à surface ternie, dispose une bougie au centre, de manière que son image se confonde avec elle, et plaçant l'œil au-delà du centre, il voit de beaux anneaux aériens. — M. Quételet place une bougie prés de l'œil, à une distance d'environ 1 mètre d'une glace plane à surface ternie, de manière que la bougie et son image paraissent se toucher, et il voit, autour de l'image, des portions d'anneaux irisés.

W. Herschel fait tomber un pinceau de rayons solaires sur un miroir sphérique concave en métal, et intercepte, au moyen d'un écran, le pinceau réfléchi; puis, formant dans l'air un nuage de poussière devant le miroir, il aperçoit des anneaux aériens assez brillants.

2306. Explication des anneaux produits par les miroirs ternis. — Newton avait voulu expliquer les anneaux formés dans les miroirs de verre par la théorie des accès. Il attribuait ces anneaux aux rayons réfléchis d'une manière diffuse par la surface étamée du miroir, rayons qui se présentaient à la surface antérieure dans différentes phases d'accés, suivant leur obliquité, et pouvaient sortir par cette surface ou être réfléchis en dedans. Biot avait étendu cette explication à l'expérience du duc de Chaulnes. Mais, indépendamment de l'absence presque complète de lumière réfléchie diffusément par le tain des glaces, nous venons de voir le rôle évident que joue la diffusion produite à la surface antérieure du miroir. Le système des ondulations donne, comme pour les lames minces, l'explication rationnelle des phénomènes. Nous ne considérerons que le cas où le faisceau incident arrive dans la direction du diamètre du miroir.

Soient *mm*, *m'm'* (*fig.* 1685) les deux faces du miroir, et *sa* un rayon incident de lumière simple. Une partie de ce rayon se réfléchira spéculairement en *a* et reviendra sur lui-même, pendant qu'une autre partie sera réfléchie

d'une manière diffuse, par les aspérités ou les poussières qui recouvrent sa surface. Une autre portion du rayon pénètrera dans le verre du miroir ; une partie directement, suivant *ab*, et l'autre en formant un cône de lumière diffuse ayant son sommet au point *a*, que nous prendrons pour point de départ, et où tous ces rayons sont évidemment dans la même phase de vibration. Le rayon direct *ab* se réfléchira en *b* en revenant sur lui-même, et se partagera encore à sa sortie, en *a*, en rayon émergeant directement suivant *as*, et en rayons diffus formant un faisceau divergent, qui se réunira au cône de rayons diffus déjà formé par la lumière incidente réfléchie à son entrée en *a*. Les rayons qui composent le cône intérieur de rayons diffus *nab* se réfléchissent sur la surface étamée, en prenant les mêmes directions que s'ils partaient du point *a'*, foyer conjugué du point *a* ; puis ils se réfractent en émergeant à la surface *m'm'*, et se trouvent dans le même cas que s'ils partaient du point *o*, foyer conjugué du point *a'*, par rapport à la surface d'émergence *mm'*.

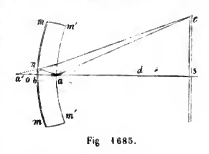


Fig 1685.

Nous avons donc trois cônes de rayons diffus, le premier a son sommet en *o*, et les deux autres, qui coïncident, ont leur sommet en *a*. Les rayons du premier ne pourront interférer, sur l'écran *cs*, avec ceux du cône formé par les rayons diffus réfléchis en *a*, à cause de la trop grande différence de marche. Mais ces rayons pourront interférer avec ceux du cône formé en *a* lors de l'émergence du rayon réfléchi *ba*; car ces deux systèmes de rayons peuvent être considérés comme ayant leur point de départ en *o*, et, par conséquent, comme se propageant dans l'air; ce qui nous dispense d'introduire les *équivalents optiques* (2231). Leur différence de marche, en arrivant en un point *c*, par exemple, sera donc $oa + ac - oc$. Si cette différence est égale à un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, il y aura lumière, et si elle est égale à un nombre impair, il y aura obscurité.

Calculons donc la différence de marche, pour en conclure les lois des diamètres. Soit $y = sc$ le demi-diamètre; *e* l'épaisseur *ab* du miroir ; *f* la distance *oa*; et *d* la distance *as* du miroir à l'écran. La différence de marche est $oa + ac - oc = f = \sqrt{y^2 + d^2} - \sqrt{(d+f)^2 + y^2}$. Egalant cette différence à $m\frac{1}{2}\lambda$, extrayant les racines, et négligeant les puissances de *y*, parce qu'il est très petit par rapport à *d*, il vient

$$y^2\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d+f}\right) = m\lambda; \quad \text{d'où} \quad y^2 = \frac{d(f+d)}{f} m\lambda; \qquad [1]$$

équation qui représente une hyperbole dont les foyers sont *a* et *o*. La trajec-

toire décrite par un point d'un anneau, quand on change la distance de l'écran au miroir, est donc sensiblement une hyperbole, et non une ligne droite, comme l'indique la théorie des accès. Tout étant symétrique autour de *sa*, chaque anneau se trouve sur l'une des nappes d'un hyperboloïde de révolution autour de cette droite. — On voit aussi que les carrés des diamètres des anneaux brillants, poûr lesquels m doit être pair, sont entre eux comme la série des nombres pairs, et que, ces carrés étant proportionnels à λ, les anneaux violets sont plus petits que ceux des autres couleurs ; d'où résultent les anneaux irisés que donne la lumière blanche.

Pour avoir la relation entre les diamètres, l'épaisseur et l'indice de réfraction n du miroir, cherchons la valeur de $f = oa$ en fonction de ces quantités. Les points a' et o snnt des foyers conjugués par rapport à un milieu indéfini limité par la surface concave *mm*. Appliquant la formule qui correspond à ce cas (1978), désignant par R le rayon de la surface *mm*, et remarquant que aa' peut être supposé égal à $2e$, en regardant le miroir comme plan dans la petite étendue *bn*, il vient $f = ao = \frac{2eR}{nR + 2e(1-n)}$; ou, en négligeant $2e(1-n)$ devant nR, $f = 2e : n$. Substituant dans la formule [1], elle devient $y^2 = \frac{d^2 n}{2e} m\lambda$. Les diamètres des anneaux de même ordre sont donc : 1° proportionnels à la racine carrée de l'indice de réfraction ; 2° en raison inverse de la racine carrée de l'épaisseur du miroir, comme l'avait trouvé Newton.

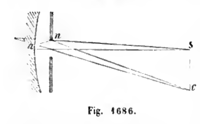


Fig. 1686.

Tout ce qui précède s'applique aux anneaux obtenus par la méthode du duc de Chaulnes, la forme plane de la lame antérieure n'ayant pas d'influence sensible sur les résultats ; seulement il faut faire $n = 1$.

Dans l'expérience de M. Pouillet, les bords de l'ouverture envoient de la lumière réfléchie, soit diffusément, soit spéculairement, dans des directions très différentes *na*, *nc*..... (*fig.* 1686), à cause de la forme du bord de cette ouverture. Un de ces rayons, *na*, réfléchi en *a* par le miroir, rencontre en *c* un autre rayon *nc*, réfléchi par le bord, et se trouve, en *c*, en concordance ou en discordance, de manière à donner lieu aux anneaux.

2307. Anneaux de M. Babinet. — Ces anneaux sont produits par des rayons réfractés d'une manière diffuse par une lame plane. On fait tomber sur une plaque de verre *ab* (*fig.* 1687), dont les faces sont légèrement ternies, un faisceau de rayons lumineux rendus convergents par une lentille L, et l'on voit sur un écran *cc* placé au foyer, des anneaux qui suivent les mêmes lois que ceux de Newton. Ces anneaux sont produits par la combinaison de rayons diffus partant des deux faces de la lame. Par exemple, le point *c* reçoit un rayon *bnc*, du cône diffus ayant son sommet en *b*, rayon qui émerge en *n* sans

diffusion ; et le rayon *ac* appartenant au cône diffus qui a son sommet en *a*, et formé par le rayon transmis *ba*. Si nous prenons le point de départ de ces rayons en *o*, la différence de route sera $oa+ac-oc$; et, en adoptant les mêmes notations que précédemment, et faisant les mêmes calculs, on retrouve la formule [1] (2306). Si l'on veut y introduire l'épaisseur *e*, et l'indice de réfraction *n* de la lame, il faut remplacer $f=ob$ par son équivalent optique $e\times n$, et il vient $y^2=\frac{d^2n}{e}m\lambda$; formule qui n'est autre chose que celle que nous avons trouvée pour les anneaux de Newton (2306), dans laquelle 2*e* serait remplacé par *e* ; ce qui tient à ce que, dans le cas du miroir sphérique, le rayon qui est réfléchi intérieurement, a dû parcourir deux fois l'épaisseur de la lame de verre.

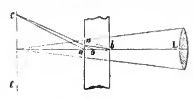


Fig. 1687.

2308. Franges produites par des lames épaisses. — Les rayons ayant éprouvé des réflexions sur les faces de lames épaisses, peuvent interférer et produire des franges, comme dans le cas des lames minces, malgré la grande différence de marche. Voici comment M. Brewster a réalisé ce phénomène, en 1817 : on dispose deux glaces bien égales (*fig.* 1688), très rapprochées, et formant un très petit angle. On regarde à travers ce système, un disque lumineux soutendant un angle de 2° ou 3°, par exemple une ouverture du volet de la chambre noire se projetant sur le ciel. On voit une image blanche de l'ouverture, suivie d'une série d'images colorées de plus en plus faibles, dirigée normalement à l'intersection des lames. Ces images, dont on ne distingue bien, ordinairement que la première, présentent 15 ou 16 bandes irisées parallèles à l'intersection, et dont les distances sont en raison inverse de l'angle des lames. Avec des glaces de 3mm d'épaisseur formant un angle de 11′, la largeur des franges est de 26′ à 27′.

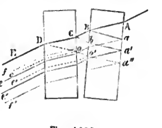


Fig. 1688.

Ces franges sont produites par l'interférence de certains rayons qui ont subi plusieurs réflexions dans les lames. Considérons seulement les rayons émergents qui n'ont subi que deux réflexions ; il est facile de voir qu'ils sont au nombre de sept. En effet, soit A un rayon incident, et ABCDE la partie qui passe directement à travers les deux glaces. La réflexion en B et *a*, donnera le rayon *e* ; et la réflexion en C et *a'*, le rayon *e'*. Ces deux rayons ne différant en longueur que de la quantité CB+C*b*, pourront interférer. Une réflexion en D et *o*, donnera le rayon émergent *c* ; et une réflexion en D

et o', le rayon c'. Ces deux rayons pourront aussi interférer, la différence de marche n'étant environ que $2oo'$. Il reste encore deux rayons émergents f, f' formés par réflexions en C et b, et en D et a''; mais leur différence de marche entre eux et avec les autres rayons émergents, étant égale au moins au double de l'épaisseur des plaques, ces rayons ne concourront pas à la formation des franges. Il ne reste donc, pour les former, que les couples de rayons e, e' et c, c'. D'après la direction des rayons incidents, direction qui dépend du point considéré du disque lumineux, la distance parcourue entre les glaces par ces rayons variera, la différence de marche $CB + Cb$ ou $2oo'$ sera d'un nombre pair de $\frac{1}{2}\lambda$ ou d'un nombre impair, et l'on apercevra, avec la lumière simple, des franges alternativement brillantes et obscures. Les systèmes de franges produites par les deux couples de rayons coïncideront sensiblement, parce que leur distance est tellement petite, qu'on peut regarder les différences de marche $CB + Cb$ et $2oo'$ comme égales.

Pour faire varier l'angle des glaces, M. Brewster les séparait par de petites masses de cire qu'il écrasait plus ou moins. On les ajuste aussi dans deux viroles emboîtées l'une dans l'autre, et à l'axe desquelles elles sont un peu inclinées ; en faisant tourner l'une des viroles, on peut amener les plaques à être parallèles, ou à former un petit angle dont le maximum est égal au double de l'angle que fait chaque lame avec le plan des viroles. — Enfin, les viroles peuvent être réunies par une charnière, et une vis sert à rapprocher plus ou moins le bord opposé.

Nous rappellerons, en terminant, les franges que M. Jamin obtient au moyen de la réflexion de rayons sur les deux faces de glaces sensiblement parallèles, et dont il a fait usage dans la construction de son réfracteur interférentiel (2238).

CHAPITRE IX.

DOUBLE RÉFRACTION.

§ 1. — DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN AXE.

I. Phénomènes et lois de la double réfraction.

2309. Quand un rayon de lumière pénètre dans un milieu homogène, il se réfracte en suivant les lois que nous avons fait connaître, et dont nous avons développé les conséquences dans le chapitre III de l'optique. Ces lois supposent (2228) que la vitesse de la lumière reste la même dans toutes les

directions que peut suivre le rayon dans l'intérieur du milieu réfringent. Mais quand ce milieu n'est pas homogéne, comme cela a lieu pour certaines substances cristallisées, le rayon se partage, en se réfractant, en deux autres rayons qui marchent séparément. Ce phénoméne, connu sous le nom de *double réfraction*, a été découvert en 1669. Un voyageur avait rapporté d'Islande de beaux cristaux qu'il remit à Erasme Bartholin; celui-ci, frappé de leur belle transparence, les fit servir à l'étude de la réfraction, dont les lois étaient encore controversées, et il découvrit la *double réfraction*. Ce phénoméne a été observé depuis, dans une foule d'autres cristaux, et Dufay a constaté qu'il ne se manifeste qu'avec ceux dont la forme primitive n'est pas symétrique autour d'un point.

Cristaux à un axe, et à deux axes. — Parmi les cristaux, il y a à distinguer ceux qui sont symétriques autour d'un axe, et ceux qui ne le sont pas. Les premiers se nomment, au point de vue optique, *cristaux à un axe*, et les derniers *cristaux à deux axes*; nous verrons plus tard pourquoi. Nous allons d'abord considérer les cristaux à un axe.

2310. PHÉNOMÈNES DE LA DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN AXE. — Les phénoménes de la double réfraction s'observent ordinairement avec le *spath d'Islande*, ou chaux carbonatée cristallisée en rhomboèdre se clivant facilement. Les plus beaux échantillons viennent d'Islande, où l'on en trouve des cristaux d'une transparence parfaite de plus de 10 centimétres d'épaisseur. Les angles des faces parallélogrammes du rhomboèdre primitif sont de 101°55', et 78°5'. On y distingue deux sortes d'angles triédres : deux qui sont opposés et formés par les arêtes de trois angles diédres obtus égaux à 105°5', et six autres formés de trois angles diédres égaux à 74°55'. La droite qui joint les deux premiers est l'*axe cristallographique* du rhomboèdre. Cet axe fait des angles de 45°23' avec les trois faces, et de 63°45' avec les trois arêtes qui aboutissent à ses extrémités.

Si l'on fait passer un pinceau de rayons solaires à travers un cristal de spath d'Islande, on voit, en général, ce rayon se bifurquer à son entrée, en formant deux pinceaux réfractés qui donnent chacun un pinceau émergent.

Rayons ordinaires et extraordinaires. — Quand on observe la double réfraction dans une lame bi-réfringente terminée par deux faces paralléles, et qu'on fait tourner cette lame sur elle-même, de maniére que ces faces restent dans le même plan, on voit l'un des rayons émergents rester en repos, pendant que l'autre tourne autour de lui. Le premier rayon suit donc les lois ordinaires de la réfraction; ce qui indique que la lumiére se propage, suivant ce rayon, avec une vitesse indépendante de sa direction dans le cristal; on le nomme *rayon ordinaire*. L'autre rayon ne suit pas les lois de la réfraction simple; la vitesse de la lumiére suivant ce rayon change donc avec sa direction dans le cristal; on le nomme *rayon extraordinaire*.

On peut aussi observer la double réfraction, en regardant un point lumineux à travers le cristal; ce point paraît double. On peut enfin poser simplement le

cristal sur une page écrite; chaque lettre paraît double. Pour nous rendre compte de ces résultats, considérons un point lumineux *s* (*fig.* 1689); le pinceau incident *si* se bifurque, et donne deux pinceaux réfractés et deux pinceaux émergents, dont un, *e*, entre dans la pupille, et fait voir l'image *r* du point *s*, pendant que l'autre, *o*, passe en dehors de l'œil. Le pinceau *si'* donne, de même, deux pinceaux émergents *o'*, *e'*, dont le premier seul entre dans la pupille, et fait voir une seconde image *r'* du point *s*. L'une des images est donc donnée par le rayon ordinaire de l'un des pinceaux, et l'autre par le rayon extraordinaire de l'autre pinceau.

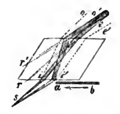


Fig. 1689.

On remarque que l'image *r'* qui correspond au pinceau le plus dévié, paraît plus rapprochée de l'œil que l'image *r*. Cela tient à ce que le sommet du pinceau conique qui a pour base la pupille, se rapproche d'autant plus de cette base que ce pinceau émergent est plus dévié, comme il est facile de s'en assurer en appliquant la loi de Descartes.

Expérience de Monge. — Supposons les faces du cristal, parallèles entre elles; les rayons émergents seront parallèles aux rayons incidents correspondants. Il faudra donc, pour que les pinceaux émergents *o'* et *e* aboutissent à la pupille, que les pinceaux réfractés se croisent dans l'intérieur du cristal, comme le montre la figure. Si donc on fait glisser sous le cristal une carte *ab*, dans le sens de la flèche, on verra disparaître, la première, l'image *r'* la plus

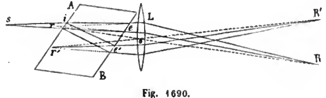


Fig. 1690.

éloignée de la carte; le faisceau *si'* étant le premier intercepté. Cette expérience curieuse est due à Monge.

2311. Appareil de projection. — Les phénomènes de la double réfraction s'observent sur une foule d'autres cristaux que le spath d'Islande; mais l'angle des deux rayons réfractés est généralement plus petit qu'avec ce dernier minéral. On peut augmenter la distance entre les deux faisceaux projetés sur un écran, au moyen d'une lentille : soit *s* (*fig.* 1690) un point lumineux qui fournit le pinceau divergent *si*. Ce pinceau se bifurque en *i* en pénétrant dans le cristal AB, et donne les pinceaux émergents *e* et *e'*, dont les sommets sont en *r* et *r'*. Les pinceaux traversent ensuite une lentille L, et vont former les images focales R, R' situées sur les axes secondaires

*r*o*R*, *r*'o*R*'. La distance RR' sera d'autant plus grande par rapport à *rr*', que la distance R'*o* sera elle-même plus grande par rapport à *r*'*o*.

2312. Cause générale de la double réfraction. — Le rayon extraordinaire n'obéit pas à la loi des sinus; ce qui montre que la vitesse de propagation de la lumière varie avec la direction de ce rayon dans le cristal. On en conclut que l'éther doit avoir une densité différente dans les diverses directions; et l'on est conduit à admettre que cette inégalité de densité est due elle-même au mode d'arrangement des molécules des cristaux bi-réfringents, molécules qui sont plus rapprochées les unes des autres dans certaines directions que dans les autres. Ce dernier fait est attesté par la netteté différente de certains clivages; les changements, suivant les directions, de l'élasticité (I,659); de la dilatabilité (II,839); de la conductibilité pour la chaleur (II,815), et pour l'électricité (III,1352); enfin, par la polarité diamagnétique (III,1812).

Cette manière de voir est confirmée par ce qui se passe dans les substances solides homogènes, quand on détruit leur homogénéité par la compression, par la trempe, etc. Ces substances produisent alors la double réfraction, comme il résulte des expériences suivantes.

Fig. 1691.

Double réfraction du verre comprimé, etc. — On pose sur un plan, comme l'a fait Fresnel [1], les uns à côté des autres et par leur face hypothénuse, quatre prismes rectangulaires en verre *a*, *b*, *c*, *d* (*fig* 1691); on applique sur leurs bases, des feuilles de carton, puis des barres d'acier, sur lesquelles on exerce, avec une vis, une forte compression, qui a pour effet de raccourcir les prismes. On place alors entre eux, trois autres prismes *m*, *n*, *o* et deux demi-prismes *r*, *t*, un peu plus courts que les premiers, auxquels on les soude avec du mastic en larmes, pour éviter les pertes de lumière par réflexion. Si l'on regarde à travers les faces *t* et *r*, un trait placé à 1 mètre de distance, on le voit double, et la distance angulaire des deux images peut aller à 6' ou 7'. Les deux faisceaux de rayons qui produisent ces images jouissent des mêmes propriétés que s'ils étaient fournis par un prisme de spath d'Islande dont les arêtes seraient parallèles à l'axe du cristal. Les prismes non comprimés sont destinés à détruire la déviation du rayon ordinaire, et à corriger la dispersion du rayon extraordinaire, dont la déviation est augmentée par chacun des prismes *a*, *b*, *c*, *d*.

M. Guérard a constaté, au moyen d'une disposition semblable, la séparation des images dans des prismes de verre trempé et par conséquent non homogènes, alternant avec des prismes de verre recuit. — La *polarisation chromatique* nous fournira plus tard des moyens très délicats de reconnaître la double réfraction dans le verre comprimé, fléchi, trempé, inégalement échauffé; dans

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XX, p. 376.

la corne, les plumes, et en général toutes les substances dans lesquelles les molécules ne sont pas également rapprochées dans diverses directions.

Dans les cristaux qui possédent un axe de figure, les molécules sont arrangées symétriquement autour de cet axe, de manière que toutes les lames normales à l'axe sont identiques et homogénes, comme il résulte de l'étude de l'élasticité et de la conductibilité dans ces lames; mais la distance des molécules y est différente, tantôt plus grande, tantôt plus petite, de ce qu'elle est quand on passe d'une lame à une autre. Les phénoménes de la double réfraction vont nous montrer qu'il en est de même pour la distribution de l'éther autour de l'axe.

Dans les cristaux à un axe, la dilatation est différente suivant l'axe et dans une direction perpendiculaire. Il en résulte que la chaleur doit diminuer l'angle de bifurcation des deux rayons; et c'est, en effet, ce qu'a constaté Fresnel.

2313. Section principale. — Si l'on pose un cristal de spath d'Islande, sur une ligne droite tracée sur une feuille de papier, et située dans le plan d'incidence, et si l'on fait tourner le cristal sur lui-même, on remarque deux positions pour lesquelles les deux images de la droite sont sur le prolongement l'une de l'autre. Quand cela a lieu, les rayons réfractés émanant d'un même point du trait sont tous les deux dans le plan d'émergence qui passe par l'œil, ou dans le plan d'incidence. Le rayon extraordinaire obéit donc à l'une des lois de la réfraction. Quand il en est ainsi, on remarque que le plan d'incidence est paralléle à la bissectrice *d* (*fig.* 1692) de l'angle obtus de la face parallélogramme du cristal, ou paralléle à la petite diagonale *ab* du losange que forme cette face, quand le cristal est régulier. Le plan d'incidence est alors paralléle au plan diagonal qui contient l'axe *bc*; car ce dernier plan est perpendiculaire à la face *anbe*, parce qu'il contient une droite *bc* également inclinée sur les côtés *be*, *bn*, et sur la bissectrice *ba* de l'angle que font ces deux côtés.

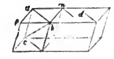


Fig. 1692.

Si l'on taille des faces artificielles dans le cristal, les deux rayons réfractés seront encore dans le plan d'incidence, quand ce plan sera parallèle à l'axe. On nomme *section principale* d'une face naturelle ou artificielle tout plan normal à cette face et parallèle à l'axe cristallographique. On peut donc dire que les deux rayons réfractés sont dans le même plan, quand le rayon incident se trouve dans la section principale. Si le rayon incident est normal à la face d'entrée, le rayon ordinaire n'éprouve pas de déviation, et le rayon extraordinaire est dévié dans la section principale.

2314. Axe optique d'un cristal. — Supposons qu'on taille à l'extrémité de l'axe *cc* d'un rhomboèdre (*fig.* 1693), une face *bad* perpendiculaire à cet axe. Un rayon tombant sur cette face sera toujours dans une section principale. Aussi, les deux rayons réfractés seront-ils toujours dans le plan

d'incidence. Si le rayon incident *s* décrit un cône droit autour de la normale, les deux rayons réfractés *o* et *e* décriront aussi des cônes droits autour de cette droite ; ce qui montre que l'éther est distribué d'une manière régulière dans toutes les sections perpendiculaires à l'axe.

Si le rayon incident est normal, on remarque qu'il n'y a plus qu'un seul rayon réfracté, dirigé normalement à la face d'entrée, c'est-à-dire parallèlement à l'axe cristallographique. Cette direction privilégiée se distingue donc par l'absence de bifurcation ; elle constitue ce qu'on nomme l'*axe optique* du cristal. M. Brewster a démontré que cet *axe optique* est parallèle, dans tous les cristaux, à l'*axe cristallographique*.

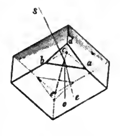


Fig. 1693.

Il est important de remarquer que l'*axe optique* n'est pas une droite fixe dans le cristal, mais une *direction* ; de sorte qu'il y a une foule de rayons, parallèles entre eux, pouvant passer suivant l'axe. Cela se conçoit bien, du reste, la marche des rayons dépendant de l'arrangement des molécules, qui se répète de la même manière sur toutes les droites parallèles entre elles.

2315. Rayons réfractés dans un plan perpendiculaire à l'axe. — Si l'on taille dans un cristal, un prisme dont les arêtes soient parallèles à l'axe, un rayon lumineux quelconque perpendiculaire aux arêtes de ce prisme, donnera deux rayons réfractés dans le plan d'incidence, et obéissant à la loi du *sinus*. Il y a donc, dans ce cas, un indice de réfraction pour le rayon extraordinaire, comme pour le rayon ordinaire. Ce résultat pouvait se prévoir, car le plan d'incidence forme une section droite dans laquelle la densité de l'éther étant constante, la vitesse de la lumière doit être la même dans toutes directions.

D'après Malus, les indices ordinaire n_o et extraordinaire n_e du *spath d'Islande* sont $n_o = 1{,}654295$, et $n_e = 1{,}483301$; et, d'après Biot, ceux du *cristal de roche*, sont $n_o = 1{,}547897$, et $n_e = 1{,}557106$, par rapport aux rayons jaunes.

2316. Cristaux positifs et négatifs. — On voit que, dans le spath d'Islande, l'indice de réfraction du rayon ordinaire est plus grand que celui du rayon extraordinaire. C'est le contraire dans le cristal de roche. Nous avons vu que, dans le *système de l'émission*, on attribue la réfraction à l'attraction du milieu réfringent sur les particules lumineuses. C'est pourquoi Biot, qui a découvert cette distinction, avait appelé *attractifs* les cristaux dont l'indice de réfraction extraordinaire est le plus grand, et *répulsifs* ceux qui sont dans le cas contraire. Dans le *système des ondulations*, la réfraction est produite par une diminution de la vitesse de la lumière dans le milieu le plus réfringent (2230). C'est pourquoi Fresnel a proposé de désigner sous le nom de *cristaux positifs*, les cristaux *attractifs*, dont l'indice extraordinaire est le plus grand,

parce que la différence entre la vitesse du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire est positive; et sous le nom de *cristaux négatifs*, les cristaux *répulsifs*, dans lesquels cette différence est négative. — Dans les cristaux *négatifs*, les molécules sont plus rapprochées suivant la direction de l'axe que dans une même section droite; on peut comparer la structure de ces cristaux à celle d'un prisme droit comprimé par les deux bases; l'axe optique serait celui du prisme. Dans les cristaux *positifs*, au contraire, les molécules sont plus écartées dans le sens de l'axe que dans la section droite.

2317. Caractères des cristaux positifs et négatifs. — Pour reconnaître si un cristal est positif ou négatif, il faut savoir distinguer le rayon ordinaire du rayon extraordinaire. C'est ce que l'on peut faire par la méthode suivante, due à M. Soleil. On colle bout à bout, par leur base triangulaire, deux prismes de la substance à étudier, de manière que les arêtes soient sur le prolongement les unes des autres. Ordinairement, ces deux prismes sont appliqués sur un prisme de verre de longueur égale à la somme de leurs longueurs, de manière que l'ensemble forme un prisme rectangulaire. L'un des prismes à essayer doit avoir une de ses faces perpendiculaire à l'axe. On regarde à travers cette face une mire parallèle aux arêtes, en plaçant l'œil à la hauteur de la jonction des deux prismes. On voit alors dans l'un des prismes une image simple, tandis que dans l'autre on en voit deux. Celle qui est sur le prolongement de l'image unique du premier prisme est évidemment l'image ordinaire; l'autre est l'image extraordinaire, et sa position par rapport à l'arête de sommet du prisme, indique le signe de la substance. Nous ferons connaître dans le chapitre suivant, des propriétés particulières aux deux rayons réfractés, qui permettent de les distinguer facilement.

On a fait diverses remarques sur certains caractères physiques des cristaux positifs ou négatifs. Dans les cristaux *négatifs*, comme le spath d'Islande, la dilatation est la plus grande dans le sens du plus petit axe d'élasticité; c'est le contraire dans les cristaux positifs. M. Babinet a remarqué que, le plus souvent, le rayon ordinaire est plus absorbé que l'autre dans les cristaux négatifs, et que c'est le contraire pour les cristaux positifs. M. de Senarmont a reconnu, dans ses *Études sur la conductibilité calorifique des cristaux* (II, 815), que les seuls exemples d'ellipsoïdes thermiques aplatis se trouvent dans les cristaux négatifs, et les ellipsoïdes allongés dans les cristaux positifs.

Nous rappellerons enfin que l'axe des cristaux positifs est attiré par les aimants, tandis que celui des cristaux négatifs est repoussé (III, 1813).

Voici la liste des principaux cristaux à un axe, positifs ou négatifs :

Cristaux attractifs ou positifs.

Zircon.	Apophyllite.	Glace.
Quartz.	Sulfate de potasse et fer.	Hyposulfate de chaux.
Tungstate de zinc.	Suracétate de cuivre et chaux.	Dioptase.
Stannite.	Hydrate de magnésie.	Argent rouge.
Boracite.		

Cristaux répulsifs ou négatifs.

Spath d'Islande.	Apatite.	Sous-phosphate de potasse.
Carbonate de chaux et magnésie.	Idocrase.	Sulfate de nickel et cuivre.
Carbonate de chaux et fer.	Vernerite.	Cinabre.
Tourmaline.	Mica.	Mellite.
Rubellite.	Phosphate de plomb.	Molybdate de plomb.
Corindon.	Phosphate de plomb arséniaté.	Octoèdrite.
Saphir.	Hydrate de strontiane.	Phosphate de chaux.
Rubis.	Arseniate de potasse.	Arséniate de plomb.
Emeraude.	Chlorure de calcium.	Arséniate de cuivre.
Chlorure de calcium.	Chlorure de strontium.	Néphéline.
Béryl.		

2318. — Lois de la double réfraction dans les cristaux a un axe. — Ces lois, relatives au rayon extraordinaire, sont destinées à en faire connaître la direction, quand on donne celle du rayon incident et la position de l'axe dans l'intérieur du cristal. C'est Huygens qui les a découvertes. D'abord peu remarquées et repoussées pendant plus d'un siècle après que Newton les eut rejetées, elles ont été remises en lumière par les expériences de Wollaston et de Malus. Huygens paraît y avoir été conduit par l'analogie, après avoir construit les rayons réfractés, dans divers cas particuliers que nous allons d'abord considérer.

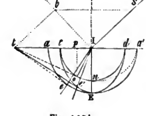


Fig. 1694.

1° Plan d'incidence perpendiculaire à l'axe. — Dans ce cas, les deux rayons suivent les lois de Descartes, et on en obtient la direction au moyen de la construction qui nous a servi pour la réfraction simple (1951). Ainsi, It (*fig.* 1694) étant l'intersection de la surface d'incidence avec le plan d'incidence, nous décrirons dans ce dernier plan, des circonférences avec des rayons égaux à $1 : n_o$ et $1 : n_e$; n_o et n_e étant les indices ordinaire et extraordinaire, nous construirons le point *t*, tel que *tb* soit égal à l'unité et soit parallèle au rayon incident *s*I, auquel I*b* est perpendiculaire, et par ce point *t* nous mènerons les tangentes *te*, *to* à ces circonférences. Les rayons réfractés seront I*e* et I*o*. Si le cristal est *négatif*, on a $n_o > n_e$, et I*e* est le rayon extraordinaire; il est plus écarté de la normale que le rayon ordinaire.

2° Face d'incidence perpendiculaire à l'axe. — Dans ce cas, les deux rayons réfractés sont dans le plan d'incidence. *cnd* (*fig.* 1694) étant toujours la circonférence ayant pour rayon $1 : n_o$, prenons sur la normale en I une longueur IE égale à $1 : n_e$, construisons une ellipse ayant pour demi-axes *c*I et IE, et menons par le point *t*, une tangente à cette ellipse; le point de contact *e'* donnera la direction du rayon extraordinaire I*e'*.

Les points de contact e' et o étant toujours sur une même perpendiculaire $e'p$ à It, le rayon extraordinaire, en supposant toujours le cristal négatif, est moins écarté de la normale que le rayon ordinaire. C'est le contraire de ce qui a lieu quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe ; car le rayon extraordinaire est alors Ie.

On peut déduire de la construction précédente, la loi analytique qui détermine la position du rayon extraordinaire. Soient r_o et r_e les angles de réfraction ordinaire et extraordinaire, les triangles pol, pe'I donnent
$pl=\overline{op}.\ \text{tang}\ r_o$, et $pl=\overline{e'p}\ .\ \text{tang}\ r_e$; d'où $\text{tang}\ r_e : \text{tang}\ r_o=\overline{op} : \overline{e'p}=n_e : n_o$. Remplaçant tang r_o par sa valeur en fonction de sin r_o, et sin r_o par sin $i : n_o$, il vient enfin, $\text{tang}\ r_e = \dfrac{n_e \sin i}{n_o\sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}}$. On voit que, si i est nul, ce qui a lieu quand le rayon incident est normal, et parallèle à l'axe, on a $\text{tang}\ r_o=0$; les deux rayons réfractés sont donc réunis en un seul parallèle à l'axe. Cela se voit sur la figure 1694, car le point t est alors à l'infini, et les points de contact des deux tangentes sont n et E.

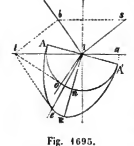


Fig. 1695.

Si le cristal était positif, on aurait $n_e > n_o$; $\text{IE}=1 : n_e$ (*fig.* 1694), correspondrait alors au rayon extraordinaire, $\text{I}a' = 1 : n_o$ au rayon ordinaire, et l'ellipse $a'n$, aurait pour demi-axes Ia' et In. On voit que le rayon qui se rapproche le plus de la normale, dans la section perpendiculaire à l'axe, est celui qui s'en rapproche le moins dans la section qui contient l'axe.

3° **Rayon incident dans une section principale.** — Dans ce cas, les deux rayons réfractés sont encore dans le plan d'incidence. Menons par le point I (*fig.* 1695) une parallèle AA' à l'axe ; cette droite sera dans le plan d'incidence, que nous prenons pour plan de la figure. Décrivons du point I comme centre, une circonférence avec un rayon égal à $1 : n_o$, prenons sur IE perpendiculaire à AA', une longueur IE égale à $1 : n_e$, et construisons une ellipse ayant pour demi-axes IA et IE. Le point de contact e de la tangente menée à l'ellipse par le point t, fera connaître le rayon extraordinaire Ie.

Si la face d'incidence at était perpendiculaire à l'axe AA', la droite IE se confondrait avec at ; et, dans le cas d'un rayon incident normal, les deux rayons se confondraient avec l'axe. Si la face d'incidence était parallèle à l'axe, IE serait perpendiculaire à at, et nous aurions le cas précédent.

2319. 4° Cas général de la construction d'Huygens. — Considérons enfin le cas où la face d'incidence et le plan d'incidence ont des directions quelconques par rapport à l'axe. Soit MN (*fig.* 1696) la face du cristal, ta l'intersection de cette face avec le plan d'incidence du rayon sI. Menons par le point I une parallèle AA' à l'axe du cristal, et construisons une ellipse ayant

pour demi-axes $IA = 1 : n_o$ et $IE = 1 : n_e$. Si nous faisons tourner cette ellipse autour de AA′, nous engendrerons un ellipsoïde de révolution. Menons par le point *t*, toujours obtenu de la même manière, et dans la face d'incidence MN, une droite $t\alpha$, perpendiculaire au plan d'incidence, et enfin par cette droite, un plan tangent à l'ellipsoïde. Le point de contact *e* fera connaître le rayon extraordinaire I*e*. Le rayon ordinaire serait donné par le plan tangent à une sphère de rayon IA, plan dont le point de contact o sera toujours dans le plan d'incidence.

Il est facile de passer de cette construction générale aux cas particuliers. Par exemple, si le plan d'incidence contient l'axe, l'intersection de l'ellipsoïde par ce plan n'est autre chose que l'ellipse génératrice, et le point de contact est nécessairement sur cette ellipse, puisque $t\alpha$ est perpendiculaire à son plan. — Si l'axe est parallèle à la face du cristal, et perpendiculaire au plan d'incidence, ce dernier coupe l'ellipsoïde suivant son équateur, et l'on retrouve la circonférence de rayon $1 : n_e$, qui sert à déterminer le rayon extraordinaire dans le premier cas.

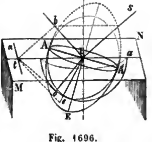


Fig. 1696.

Telle est la construction remarquable d'Huygens. Quand on veut en faire l'application, on détermine l'angle du plan de réfraction du rayon extraordinaire avec le plan d'incidence, et l'angle de ce rayon avec la normale, soit par les méthodes de la géométrie descriptive, soit par celles de la géométrie analytique à trois dimensions.

2320. Vérifications expérimentales. — Huygens a fait beaucoup d'expériences pour établir l'exactitude de la construction qui précède. Plus tard, Wollaston et Malus l'ont soumise aux vérifications les plus attentives. Pour cela, il leur a fallu déterminer par l'expérience la position des rayons réfractés dans le cristal. Voici le moyen ingénieux qu'employait Malus :

Méthode de Malus pour trouver la position des rayons réfractés. — On trace sur une lame d'ivoire bien horizontale, un triangle *rectangle* très allongé ABC (*fig.* 1697), dont les côtés portent une division très fine, et l'on pose sur ce triangle un cristal épais à faces parallèles, à travers lequel on le regarde. On aperçoit alors deux images *abc*, *a′b′c′*. L'hypothénuse do l'image ordinaire *abc* paraît couper en *n* le côté *a′c′* de l'image extraordinaire, et les distances *an* et *a′n* sont connues par la division tracée sur les côtés. Si nous prenons A*e* = *an* et Ao= *a′n*, nous aurons sur le triangle réel, les deux points o et *e* dont les images se confondent en *n* ; l'une, celle de *o*, formée par le rayon ordinaire qui part de ce point ; l'autre, celle de *e*, par le rayon extraordinaire qui en part. Ces deux rayons se confondent en un même rayon émergent I*l*. On conclut de là que, si un rayon incident tombait sur le cristal suivant *l*I, il donnerait les rayons réfractés Io et I*e*. Pour connaître la position de chacun de

ces rayons, il suffit de connaître celle du point p, projection du point d'incidence I, et l'épaisseur Ip du cristal. Pour obtenir le point p, on tend en I sur la surface supérieure du cristal, deux fils très fins croisés à angle droit, et l'on vise le point de croisement, avec une lunette à réticule l, mobile sur un limbe vertical ; le point n paraît alors coïncider avec le point de croisement I des fils. On vise ensuite un point m d'une division rectangulaire mm' tracée sur la table sur laquelle sont posés la lame d'ivoire et le cristal. Si l'on joignait ce point m au point o, on aurait la trace du plan d'incidence, puisque le rayon ordinaire Io se trouve toujours dans le plan d'incidence. On transporte ensuite le cercle répétiteur dans une autre position, et visant toujours au point I, on observe deux images du triangle, et un nouveau point de rencontre tel que n correspondant à deux nouveaux points analogues à o et e. On vise ensuite un point m' de la table. On enlève le cristal, et l'on joint m' au nouveau point analogue à o, puis le point m au point o, et l'on a ainsi les deux traces des deux plans d'incidence, traces qui se coupent précisément au point p.

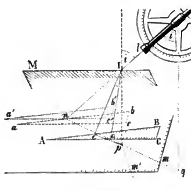


Fig. 1697.

Si maintenant on joint pe, l'angle epo mesure l'angle du plan de réfraction extraordinaire avec le plan d'incidence ; et les angles olp, elp des rayons Io et Ie avec la normale, sont donnés par les relations tang $\overline{elp} = ep$: E, tang $\overline{olp} = op$: E, en désignant par E l'épaisseur Ip du cristal.

Quant à la direction du rayon incident, elle est donnée par celle du plan d'incidence dont la trace est mp, et par l'angle d'incidence i, égal à celui que fait la lunette avec la verticale. Il reste à comparer cette direction à celle de l'axe du cristal ; axe dont la position est connue, d'après la manière dont la lame a été taillée, par l'angle qu'il fait avec les faces parallèles et avec un côté d'une de ces faces.

Au lieu de déplacer le cercle répétiteur, dont l'installation demande beaucoup de soin, on place le cristal sur une petite plate-forme pouvant tourner sur elle-même, et l'on fait en sorte que le croisement des fils tendus en I soit sur l'axe de rotation. Il en est ainsi, quand ce croisement ne se déplace pas dans le champ de la lunette pendant que le cristal tourne.

2321. Interprétation théorique de la construction d'Huyghens. — Nous avons vu que, dans la construction d'Huyghens appliquée à la réfraction simple, la circonférence décrite avec un rayon égal à $1 : n$, n'est autre chose qu'un grand cercle d'une sphère qui représente la surface de l'onde

(2230). Il en est de même de la circonférence de rayon $1 : n_e$, qui sert à construire le rayon extraordinaire dans le cas du plan d'incidence perpendiculaire à l'axe. L'analogie porte à admettre que la surface de l'ellipsoïde de révolution qui sert à trouver ce rayon dans les autres cas, représente aussi la surface de l'onde extraordinaire, surface qui n'est plus sphérique, à cause du défaut de symétrie dans la distribution de l'éther autour du rayon réfracté. C'est, en effet, ce que Huyghens a cherché à démontrer, et ce qui résulte de la belle théorie de la double réfraction développée par Fresnel. Mais ce n'est qu'après avoir établi le sens des vibrations de l'éther par rapport à la direction de la propagation, ce que nous ferons dans le chapitre suivant, que nous pourrons montrer comment cette théorie permet de déterminer la surface de l'onde. — La forme de cette surface conduit à l'énoncé très simple qui suit, des lois qui régissent le rayon extraordinaire :

Vitesse du rayon extraordinaire. — Si nous supposons un ellipsoïde de révolution autour de l'axe du cristal, et ayant pour demi-axe polaire $1 : n_o$, et pour rayon équatorial $1 : n_e$, la vitesse de la lumière suivant le rayon extraordinaire sera proportionnelle au demi-diamètre de l'ellipsoïde parallèle à sa direction. La longueur de ce demi-diamètre se calculera par les méthodes analytiques, ou par celle de la géométrie descriptive, après qu'on aura déterminé la direction du rayon extraordinaire. Nous remarquerons que le rayon extraordinaire marche en ligne droite, comme le rayon ordinaire, mais qu'il n'est plus, en général, perpendiculaire à la surface de l'onde.

Il résulte de ce qui précède, que, dans les cristaux *négatifs*, la vitesse du rayon extraordinaire est maximum dans le plan perpendiculaire à l'axe ; puisque, dans ce cas, on a $1 : n_o < 1 : n_e$; et qu'elle est minimum dans le cas des cristaux *positifs*, l'ellipsoïde étant alors aplati. La différence de vitesse des deux rayons atteint donc son maximum dans les deux cas. On voit aussi que, dans le cas où les deux rayons coïncident en marchant parallèlement à l'axe, leur vitesse est la même ; tandis que, dans le cas du rayon incident normal à l'axe, les deux rayons, quoique suivant la même route, sont encore distincts. En effet, la vitesse de la lumière, dans l'un, est représentée par In (*fig.* 1694), et dans l'autre, par IE, valeurs maximum, ou minimum.

Ces derniers résultats peuvent aussi se déduire de la formule de Fresnel, qui donne la vitesse du rayon extraordinaire en fonction de l'angle que fait ce rayon avec l'axe. Cette formule est

$$v^2 = u^2 + (u'^2 - u^2)\sin^2 a,$$

dans laquelle u et u' représentent les quantités $1 : n_o$ et $1 : n_e$. Cette formule exprime que *la différence des carrés des vitesses ordinaire et extraordinaire est proportionnelle au carré du* sinus *de l'angle que fait le rayon extraordinaire avec l'axe.* Car u est la vitesse constante du rayon ordinaire, et u' la valeur, maximum ou minimum, de celle du rayon extraordinaire. Si $u' = u$, on a $v = u$. C'est ce qui a lieu pour une substance homogène.

Si le rayon est dirigé suivant l'axe, on a $a=0$, et $v^2=u^2$. La vitesse est donc égale à celle du rayon ordinaire. Si $a=90°$, il vient $v^2=u'^2$.

On voit aussi que, dans les cristaux négatifs, pour lesquels on a $n_o > n_e$, et par conséquent $u < u'$, le coefficient de $\sin^2 a$ étant négatif, v est plus petit que u; c'est donc quand $a=0$, c'est-à-dire parallélement à l'axe optique, que la vitesse est minimum. C'est le contraire pour les cristaux positifs, comme la construction d'Huyghens nous l'a déjà appris.

2322. Émergence des rayons ordinaire et extraordinaire. — Nous n'avons considéré jusqu'à présent que les rayons qui pénétrent dans le milieu cristallisé. Voyons maintenant quelle marche suivent ces rayons quand ils sortent de ce milieu pour passer dans un milieu homogéne.

Rayon ordinaire. — Le rayon ordinaire se comporte comme s'il sortait d'un milieu homogène; on peut donc lui appliquer tout ce qui a été dit dans le cas de la réfraction simple (1942).

Émergence du rayon extraordinaire. — Ce rayon se construit au moyen de l'ellipsoïde d'Huyghens, en faisant les constructions dans un autre ordre. Supposons que *eI* (*fig.* 1696) soit un rayon extraordinaire qui se présente à la face d'émergence MN. Aprés avoir construit l'ellipsoïde de révolution autour de la parallèle AA′ à l'axe du cristal, on méne par le point *e* où le rayon perce sa surface, un plan tangent qui coupe la face d'émergence MN suivant la droite *αt*. Menant par le point I un plan perpendiculaire à *αt*, on a le plan d'émergence. Si maintenant on connaissait le point *b*, il serait facile d'obtenir le rayon émergent I*s*. Or, l'angle en *b* étant droit, et la longueur *tb* égale à l'unité, on décrira sur *t*I comme diamètre une demi-circonférence, on prendra la corde *tb* égale à l'unité, puis menant par I une parallélc à *tb*, on aura le rayon émergent I*s*. Le plan tangent mené par *αt* à la sphére de rayon AI, donnerait le rayon ordinaire *o*I, que nous appellerons le *rayon correspondant* au rayon extraordinaire *e*I.

On voit que ces deux rayons correspondants sont caractérisés par la condition de ne donner qu'un seul rayon émergent. Il est cependant un cas où ils en donnent deux; c'est celui où ils sont réunis en un seul marchant suivant la perpendiculaire à l'axe du cristal, quand la face d'émergence est oblique à leur direction commune. Soit, en effet EI (*fig.* 1695) le rayon qui se présente au point I de la surface d'émergence *at*. Pour appliquer la construction précédente, il faudra, par les points E et *n*, mener des tangentes à l'ellipse, et à la circonférence. Ces deux tangentes étant parallèles, donneront deux points *t* différents, et la construction du point *b* conduira à deux rayons émergents. Ce résultat n'a rien qui doive surprendre, les deux rayons qui marchent suivant EI rencontrant la surface d'émergence sous le même angle, et possédant des vitesses différentes, entre elles comme IE : I*n*.

Angle limite. — Si l'angle que fait le rayon *s*I avec la normale est droit, la distance I*t* (*fig.* 1696), sera égale à l'unité, et le plan tangent mené par *tα* à l'ellipsoïde donnera la direction du dernier rayon qui, arrivant de l'intérieur

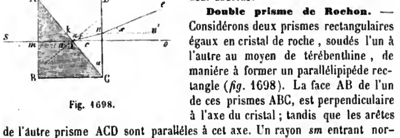
du cristal, à la face MN, pourra émerger dans le plan *slt*. Tout rayon qui s'écarterait davantage de la normale ne pourrait émerger. Il résulte de là que, si l'on décrit du point I comme centre, et dans le plan MN, une circonférence avec un rayon égal à 1, et si l'on mène par toutes les tangentes à cette circonférence des plans tangents à l'ellipsoïde, la série des points de contact formera sur l'ellipsoïde, la directrice d'un cône ayant son sommet en I, et dans lequel seront compris tous les rayons pouvant émerger. La même construction appliquée au rayon ordinaire, donnerait évidemment un cône droit ayant pour axe la normale.

2323. Passage des rayons d'un cristal dans un autre. — Quand les rayons qui ont traversé un cristal à un axe émergent dans un autre cristal à un axe, le rayon ordinaire se comporte, quant aux directions des rayons réfractés, comme un rayon qui viendrait d'un milieu homogène.

Le *rayon extraordinaire* se bifurque en deux rayons, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire. Mais l'expérience montre que ces rayons n'ont pas les directions qui correspondent au rayon extraordinaire qui se présente à l'émergence ; ils ont les directions qui corrrespondent au *rayon ordinaire correspondant* à ce dernier rayon, que l'on peut toujours construire par le procédé indiqué ci-dessus (2322). — Ce qui précède s'applique aux rayons ordinaire ou extraordinaire se réfléchissant à la surface d'émergence, en dedans du cristal. Chacun d'eux se comporte comme s'il venait du dehors, dans une direction symétrique au rayon intérieur incident. Il faudra donc, dans le cas du rayon extraordinaire, construire le rayon symétrique, puis le *rayon ordinaire correspondant* de ce dernier, et appliquer à ce dernier la construction d'Huyghens.

II. Micromètre à double image de Rochon.

2324. Rochon a fait une heureuse application de la double réfraction, à la mesure des diamètres apparents des objets éloignés, et par conséquent de leur distance quand on connaît leur grandeur absolue.



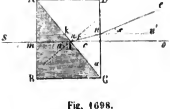


Fig. 1698.

Double prisme de Rochon. — Considérons deux prismes rectangulaires égaux en cristal de roche, soudés l'un à l'autre au moyen de térébenthine, de manière à former un parallélipipède rectangle (*fig.* 1698). La face AB de l'un de ces prismes ABC, est perpendiculaire à l'axe du cristal ; tandis que les arêtes de l'autre prisme ACD sont parallèles à cet axe. Un rayon *sm* entrant normalement à la face AB, ne sera ni dévié ni bifurqué, tant qu'il restera dans le prisme ABC; mais arrivé en I, il se bifurquera. Le rayon ordinaire conti-

nuera de marcher en ligne droite suivant I*o*, puisque l'indice de réfraction qui lui correspond reste le même; tandis que le rayon extraordinaire se déviera suivant I*ne*, en se rapprochant de la normale à AC. L'angle *eco* ou *enn'* des deux rayons I*o*, *ne*, se nomme l'*angle de duplication*. Cherchons-en la valeur en fonction de l'angle $a = ACD$, et des indices de réfraction ordinaire n_o, et extraordinaire n_e.

Calcul de l'angle de duplication. — Cet angle, x, est égal à l'angle d'émergence *enn'*, et l'on a $\sin x = n_e \sin knI$. Menons la normale à AC, nous aurons $knI = a - r$, et par conséquent, $\sin x = n_e \sin (a - r)$. Pour obtenir r, remarquons que le rayon *s*I se réfracte en I, en passant d'un milieu où son indice est n_o, dans le second prisme où son indice est n_e. On a donc $\sin a : \sin r = n_e : n_o$, d'où l'on tirera la valeur de r. La valeur de x augmente avec l'angle a, mais elle est toujours très petite, n_o et n_e différant peu dans le

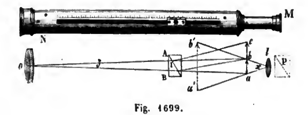


Fig. 1699.

cristal de roche (2315). Elle n'est que de 57′ 40″ pour $a = 60°$, et de 19′ 30″ pour $a = 30°$.

2325. Lunette de Rochon. — Le double prisme est installé dans l'intérieur d'une lunette astronomique, la face AB (*fig.* 1698) tournée du côté de l'objectif *o* (*fig.* 1699), et perpendiculaire à l'axe de l'instrument, le long duquel le prisme peut se déplacer. Il se forme alors deux images focales d'un objet éloigné; l'image ordinaire *ab*, qui se construit comme si le prisme n'existait pas, et l'image extraordinaire *bc*. Ces images sont d'autant plus écartées l'une de l'autre, que le prisme est plus éloigné du lieu de leur formation, puisque l'angle de duplication reste constant. De plus, ces images peuvent être considérées comme égales entre elles, à cause de la petitesse de cet angle. On fait en sorte, en faisant glisser le prisme le long de l'axe, que les deux images soient tangentes l'une à l'autre. Alors l'angle *clb* est égal à x, et le triangle *clb* donne $\tang x = cb : lb = h : d$, en désignant par h la hauteur de l'image, et par d sa distance au prisme AB. Le triangle *boa* donne, de son côté, $\tang \delta = h : oa = h : F$, en appelant F la distance focale principale de l'objectif. Remplaçant h par sa valeur tirée de $\tang x = h : d$, il vient $\tang \delta = \frac{\tang x}{F} d$, formule qui montre que la tangente du diamètre apparent est proportionnelle à la distance d du prisme, au foyer principal de

l'objectif; car tang x : F est constant. L'oculaire, au moyen duquel on observe la double image, ne change rien aux résultats, et il permet d'établir le contact des deux images avec une grande précision.

Désignons par H la hauteur absolue de l'objet éloigné, et par D sa distance à l'objectif, nous aurons tang $\delta = H : D$, valeur qui, égalée à la précédente, nous donne

$$\tang \delta = \frac{H}{D} = \frac{\tang x}{F} d, \qquad \text{ou} \qquad \frac{H}{D} = kd; \qquad [1]$$

en désignant par k la quantité constante tang x : F. Au lieu de calculer cette constante, on la détermine directement, en visant un objet dont la hauteur H et la distance D sont connues. La formule [1] donne ensuite les valeurs de D quand on connaît H, ou celles de H quand on connaît D.

On voit en NM (*fig.* 1699) l'ensemble de l'instrument, nommé *micromètre à double image* ou *lunette de Rochon*. On y distingue un bouton, au moyen duquel on fait glisser le prisme dans le tube. La tige qui réunit le bouton au prisme, passe par une fente au bord de laquelle est une division qui donne la distance du prisme au foyer de l'objectif. Le vernier qui se meut avec le bouton, est au zéro de cette division quand, le prisme étant au foyer, les deux images se confondent. Pour éviter les calculs, les nombres inscrits auprès de la division ne représentent pas les distances d, mais les valeurs de kd; de sorte qu'on a *tang* δ par une simple lecture, et il suffit de diviser par le nombre inscrit, la hauteur H supposée connue d'un objet, pour obtenir sa distance D. Pour les usages de la guerre, où l'on prend pour H la hauteur moyenne d'un fantassin, on inscrit sur l'échelle les valeurs de H : kd ; de sorte qu'on obtient par une simple lecture la distance approchée.

2326. Modification d'Arago. — Quand on veut appliquer la lunette de Rochon à la mesure du diamètre angulaire des astres, particulièrement du soleil ou de la lune, pour lesquels d est assez grand, il devient difficile d'établir exactement le contact entre les deux images, à cause des franges irisées qui bordent l'image extraordinaire, dans le voisinage même du point de contact. Pour obvier à cet inconvénient, Arago emploie une lunette munie d'un *oculaire polyalde* (2204), dont le grossissement change par le déplacement d'un des verres qui le composent. Le double prisme se place alors en dehors, en P (*fig.* 1699), entre l'oculaire et l'œil, de manière que la dispersion est insensible. Les deux images virtuelles que l'on aperçoit à travers le prisme ne sont pas, en général, en contact ; mais on les y amène en faisant varier le grossissement. Quand cette condition est remplie, le diamètre apparent x de l'image virtuelle $a'b'$ vue à travers l'oculaire, est égal à l'angle de duplication x, puisque le rayon aa' qui passe par le bord inférieur de l'image supérieure passe également par le bord supérieur de l'image inférieure. Cela suppose l'œil placé au centre optique de la lentille l, ce qu'il est permis d'admettre, à cause de la petitesse de l'angle x. Or, en appelant f la distance focale principale

de l'oculaire, on a tang $x = ab : f$. On a aussi tang $\delta = ab$: F ; d'où F : $f =$ tang x : tang δ. Or F : f n'est autre chose que le grossissement G de la lunette (2059) ; on a donc G tang $\delta =$ tang x. Le grossissement G, correspondant à chaque position du verre mobile, est mesuré d'avance et indiqué par une échelle gravée sur le côté du tube oculaire. Comme le déplacement de ce verre est peu étendu, on a plusieurs prismes correspondants à différentes valeurs de x, et l'on emploie ceux qui donnent les plus petites, quand on veut évaluer de grands diamètres apparents.

2327. Mesure du grossissement des lunettes. — Arago a appliqué le double prisme à la mesure du grossissement des lunettes. Il suffit, en effet, pour connaître ce grossissement, de viser un disque qu'on fait éloigner peu à peu jusqu'à ce que les deux images soient en contact. Connaissant la distance et la grandeur du disque, la formule tang $\delta = \frac{1}{G}$ tang x = H : D donne $G = \frac{D}{H}$ tang x. Au lieu de calculer tang x, on peut l'évaluer directement en regardant le disque à travers le prisme seul, et s'éloignant jusqu'à ce que les deux images paraissent en contact. On a alors tang x = H : D. Ce procédé peut s'appliquer aux microscopes, en plaçant un micromètre sur le porte-objet.

§ 2. CRISTAUX A DEUX AXES.

2328. Il n'y a pas de rayon ordinaire. — Les cristaux dits à deux axes ne présentent de symétrie, ni autour d'un point, ni autour d'un axe. Ils produisent la double réfraction ; mais il est à remarquer qu'aucun des deux rayons ne suit les lois de Descartes. Pendant longtemps on avait admis qu'il existait un *rayon ordinaire* ; mais Fresnel a démontré qu'il n'en est pas ainsi [1]. Voici l'expérience la plus directe qu'il a imaginée à ce sujet :

Il tailla, dans une topaze, plusieurs morceaux dans divers sens, les colla les uns aux autres par leurs faces planes, et tailla en prisme la masse ainsi obtenue. Ayant regardé à travers ce prisme, une ligne droite parallèle à ses arêtes, les deux images furent des lignes brisées ; tandis que l'une d'elles eût été rectiligne si les rayons qui la produisaient eussent obéi aux lois de Descartes.

Fresnel avait d'abord employé un moyen très délicat, mais moins direct : il taillait des lames minces dans une même topaze dans différentes directions, et leur donnait la même épaisseur, en les travaillant ensemble. Plaçant ensuite deux de ces lames, chacune sur l'une des fentes, dans l'expérience d'Young (2221), il obtenait toujours un déplacement des franges, allant quelquefois à 20 rangs ; d'où il concluait que la lumière traverse les deux lames, avec des

[1] *Annales de chimie et de physique*, t. XX, p. 337.

vitesses différentes (2230). Or, la vitesse serait constante si le rayon suivait les lois de Descartes.

Quand le cristal est épais et terminé par deux faces parallèles, il suffit de le poser sur un point marqué sur une feuille de papier, et de le faire tourner sur lui-même ; on voit les deux images se déplacer.

2329. Axes optiques. — Dans les cristaux non symétriques autour d'un axe, il y a deux directions suivant lesquelles le rayon incident passe sans se bifurquer. Ces directions se nomment *axes optiques* du cristal ; et c'est pour cela qu'on a donné à ces sortes de cristaux le nom de *cristaux à deux axes*. On ne connaît pas de cristaux à plus de deux axes.



Fig. 1700.

On nomme *ligne moyenne* ou *intermédiaire*, une droite qui partage l'angle aigu des deux axes en deux parties égales ; et *ligne supplémentaire*, celle qui divise de même l'angle obtus. Ces deux droites, perpendiculaires l'une à l'autre, sont dans le *plan des axes*. Si nous considérons en outre une droite perpendiculaire au plan des axes optiques, nous aurons les trois lignes qui portent le nom d'*axes de cristallisation* ou d'*axes d'élasticité* du cristal. Remarquons que ces axes, pas plus que les *axes optiques*, ne sont pas des lignes fixes, mais des *directions*.

2330. Sections principales. — Si nous menons par les lignes *moyenne* et *supplémentaire*, des plans perpendiculaires au plan des axes optiques, nous aurons les deux *sections principales* du cristal. La première se nomme *section moyenne*, et la seconde *section supplémentaire*. Voici quelques exemples de la position des axes et des sections principales.

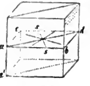


Fig. 1701.

Considérons d'abord l'*aragonite* ou carbonate de chaux cristallisé en prisme droit à base rhombe, pouvant se cliver parallèlement à la base. La ligne moyenne *ii* (*fig.* 1700) est parallèle aux arêtes latérales du prisme, et les axes sont situés dans le plan *ad* qui passe par les grandes diagonales des bases. Une des sections principales est un plan parallèle aux bases et la seconde un plan parallèle aux deux petites diagonales des bases. — Citons encore le *sulfate de chaux*, qui cristallise en prisme droit ayant pour base un parallélogramme dont l'angle aigu est de 66° 52′, et qui se clive parallèlement aux bases (*fig.* 1701). Le plan des axes est aussi parallèle aux bases, et, si nous prenons les côtés du parallélogramme dans le rapport de 36 à 13, la grande diagonale *ad* donne la direction de la ligne moyenne ; elle fait un angle de 16° 13′ avec le plus grand côté. Les sections principales sont le plan diagonal *a′ad* et le plan perpendiculaire *abdc*.

M. J. Herschel a reconnu que la direction des axes n'est pas la même pour les différentes couleurs simples ; mais la *ligne moyenne* reste toujours la même.

M. Soret a constaté que le plan des axes optiques est toujours disposé symétriquement par rapport aux faces du cristal primitif, et que les axes forment des angles égaux avec ces faces.

Nous verrons plus tard comment on peut distinguer, au moyen de la *polarisation chromatique*, les cristaux à un axe, des cristaux à deux axes, et comment on peut mesurer l'angle des axes de ces derniers.

2331. Marche des rayons dans les sections principales. — Quand le plan d'incidence se confond avec une des sections principales, les deux rayons réfractés restent dans ce plan, et l'un d'eux obéit à la loi du sinus. Il est à remarquer que celui des rayons qui suit cette loi dans la section moyenne, ne la suit pas dans la section supplémentaire et *vice versâ*. Il y a donc, pour chaque rayon, un indice de réfraction analogue à celui du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire des cristaux à un axe. Il est à remarquer que toujours il y a bifurcation dans les sections principales, même quand le rayon est normal à la face d'incidence, si ce n'est quand le rayon passe parallèlement à l'un des axes; mais alors il y a deux rayons émergents quand la face d'émergence est oblique à cet axe.

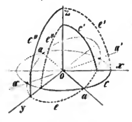


Fig. 1702.

2332. Forme de la surface de l'onde dans les cristaux à deux axes. — La théorie d'Huyghens ne peut convenir aux cristaux à deux axes. On avait bien fait quelques essais pour y faire rentrer les phénomènes que produisent ces sortes de cristaux, mais on admettait alors qu'il y avait un rayon ordinaire. Fresnel est parvenu à établir une admirable théorie, dont nous parlerons plus tard (2398), qui comprend à la fois la double réfraction dans les cristaux à deux axes et à un axe, et l'explication de la *polarisation* que ces cristaux impriment aux rayons qui les traversent. Indiquons dès à présent la forme générale de la surface de l'onde, à laquelle conduit cette théorie dans le cas des cristaux à deux axes.

Il résulte de la théorie de Fresnel, que la surface de l'onde propagée dans un cristal à deux axes, par un ébranlement arrivant au point d'incidence d'un rayon venant de l'extérieur, est une surface du 4e degré à 2 nappes, qui correspondent chacune à un des rayons réfractés. Ces deux surfaces, ou nappes, qui ne sont ni des sphères ni des ellipsoïdes, se coupent suivant certaines courbes, par quatre points desquelles passent les axes optiques.

Si nous supposons que *xy*, *xz*, *yz* (*fig.* 1702) soient trois plans rectangulaires passant par les *axes d'élasticité* du cristal, ces plans *particuliers* couperont la surface de l'onde suivant des ellipses et suivant des circonférences. Dans la figure, les courbes pleines *c*, *c'*, *c''* sont des arcs de cercle, et les courbes ponctuées *e*, *e'*, *e''*, des arcs d'ellipse. La droite *aoa*, qui passe par l'intersection des arcs *e* et *c*, est un des axes optiques, et *a'oa'* est l'autre axe. *ox* est la ligne moyenne, et par conséquent *oy*, la ligne supplémentaire.

Les trois plans xy, xz, yz sont donc le plan des axes et les deux sections principales.

Les vitesses v, v' des rayons sont données par les formules.

$$v^2 = u^2 + (u'^2 - u^2)\sin^2 \tfrac{1}{2}(a' - a),$$
$$v'^2 = u^2 + (u'^2 - u^2)\sin^2 \tfrac{1}{2}(a' + a).$$

Dans lesquelles u et u' représentent l'unité divisée par les indices de réfraction des rayons dans les plans principaux, où ils suivent la loi de Descartes, et a, a' les angles qu'ils font avec les axes. On déduit de là :

$$v'^2 - v^2 = (u'^2 - u^2) \sin a' \sin a.$$

La différence des carrés des vitesses des deux rayons est donc proportionnelle au produit des sinus des angles qu'ils font avec les deux axes.

Ces formules comprennent le cas des cristaux à un axe ; en y faisant $a = a'$, ce qui donne $v^2 = u^2$ et $v'^2 = u^2 + (u'^2 - u^2)\sin^2 a$. La première formule montre que la vitesse d'un des rayons est constante ; la seconde, citée plus haut (2321), correspond au rayon extraordinaire. Dans les cristaux à un axe, les deux nappes de la surface générale de l'onde, deviennent, l'une une sphère, l'autre un ellipsoïde de révolution autour de l'axe du cristal. Les deux nappes ne se coupent plus, mais elles se touchent aux extrémités de l'axe (2319).

2333. Structure des cristaux à deux axes. — La double réfraction dans les cristaux à deux axes est due, comme celle des cristaux à *un axe*, à l'inégale distance des molécules, et, par conséquent, à l'inégale densité de l'éther dans les différentes directions. On a remarqué que les cristaux à deux axes se dilatent le plus dans le sens du plus petit axe d'élasticité, ou de la ligne moyenne ; ce qui montre que les molécules sont plus rapprochées dans le sens de cette ligne. Fresnel a trouvé que la chaleur diminue la double réfraction, en tendant à égaliser les distances entre les molécules. Le sulfate de chaux présente à cet égard une particularité curieuse, découverte par M. Brewster : on peut, en l'échauffant, faire que les deux axes se confondent, et former ainsi un cristal à un axe. Si l'on élève davantage sa température, les axes se séparent de nouveau, mais dans un plan perpendiculaire à leur premier plan ; ce qui montre que les dilatations inégales parallèlement aux trois axes d'élasticité, ont changé les rapports entre ces axes.

La structure des cristaux à deux axes peut être imitée en comprimant un prisme à base carrée, inégalement par les faces latérales opposées ; la distance des molécules, constante dans la direction de chaque compression et dans celle qui lui est perpendiculaire, est différente d'une direction à l'autre. La direction de la plus petite compression donne l'axe de moyenne élasticité, perpendiculaire aux axes optiques ; et celle de la plus grande compression donne l'axe de plus petite élasticité, ou la ligne moyenne.

MM. Moigno et Soleil ont pu transformer par la compression, un cristal à

un axe en un cristal à deux axes. Un cristal négatif *à un axe* taillé en prisme droit à base carrée, ayant ses arêtes parallèles à l'axe, ayant été comprimé par deux faces latérales opposées, produisit certains phénomènes de coloration auxquels on reconnaît les cristaux à deux axes, comme nous le verrons plus loin. Le plan des axes optiques était perpendiculaire au sens de la compression, qui est celui de la moyenne élasticité ; l'élasticité qui était maximum suivant l'axe unique avant la compression, restant ordinairement maximum pendant qu'elle s'exerce. Si le cristal était positif, l'élasticité était minimum suivant l'axe. C'est donc dans le sens de la compression qu'elle devient maximum, et c'est en effet dans un plan normal à l'axe primitif que se trouvent alors les deux axes optiques. — M. Pfaff a fait des expériences analogues sur le cristal de roche et le spath d'Islande.

TABLE DES CRISTAUX A DEUX AXES

	Angle des axes.			Angle des axes.	
Sulfate de nickel (certains échantillons)	3°	00'	Topaze	49 à 65	»
Sulfocarbonate de plomb	»	»	Sucre	50	»
Carbonate de strontiane	6	36	Sulfate de strontiane	50	»
Carbonate de baryte	»	»	Sulfhydrochlorate de magnésie et fer	51	16
Azotate de potasse	5	20	Sulfate de magnésie et ammoniaque	51	22
Talc	7	24	Phosphate de soude	55	20
Perle	11	28	Comptonite	56	6
Hydrate de baryte	13	18	Sulfate de chaux	60	»
Aragonite	18	18	Azotate d'argent	62	16
Cyanure de potassium	19	24	Iolithe	62	50
Cymophane	27	51	Feldspath	63	»
Anhydrite	28	7	Sulfate de potasse	67	»
Borax	28	42	Carbonate de soude	70	1
Apophyllite	35	8	Acétate de plomb	70	25
Sulfate de magnésie	37	24	Acide citrique	70	29
Sulfate de baryte	37	42	Tartrate de potasse	71	20
Spermaceti (environ)	37	40	Acide Tartrique	79	»
Borax natif	38	48	Tartrate de potasse et soude	80	»
Azotate de zinc	40	»	Carbonate de potasse	80	30
Stilbite	41	42	Cyanite	81	48
Sulfate de nickel	42	4	Chlorate de potasse	82	»
Carbonate d'ammoniaque	43	24	Epidote	84	19
Sulfate de zinc	44	28	Chlorure de cuivre	84	30
Anhydrite (Biot)	44	41	Péridot	87	56
Lépidolithe	45	»	Acide succinique	90	»
Benzoate d'ammoniaque	45	8	Sulfate de fer	90	»
Sulfate de soude et magnésie	46	49	Mica	de 0 à 76	»
Sulfate d'ammoniaque	45	8			

On voit que la *topaze*, et surtout le *mica*, présentent des angles très différents suivant les échantillons. M. de Sénarmont a expliqué cette anomalie, en considérant ces substances comme des mélanges de deux substances *isomorphes* ayant le plan des axes dirigé perpendiculairement, dans les cristaux des deux substances. Il a reconnu, en effet, comme nous le verrons plus tard, que le cristal donné par un mélange a, suivant les proportions, ses axes plus ou moins écartés, ou placés dans des plans tournés de 90°, d'un mélange à un autre. Pour que l'explication s'appliquât au *mica*, il faudrait donc qu'il présentât des échantillons dont le plan des axes serait dirigé différemment. Or, c'est ce qui résulte d'un long et beau travail de M. de Sénarmont[1] : après avoir prouvé que le mica est cristallisé en prisme droit à base rhombe, il a constaté que le plan des axes est parallèle, tantôt à la grande, tantôt à la petite diagonale de la base ; ce que M. B. Silliman junior avait, de son côté, constaté sur quelques échantillons.

CHAPITRE X.

POLARISATION RECTILIGNE.

> Le mouvement de la lumière dans un milieu homogène où elle est engendrée, se propage par des pulsations ou ondulations qui sont perpendiculaires à la direction des rayons.
>
> R. Hooke (*Hist. de la Soc. roy. de Londres*, par Birch, t. III, p. 12).

§ 1. — CARACTÈRES PRINCIPAUX DE LA LUMIÈRE POLARISÉE ET EXPLICATION DE LA POLARISATION.

I. Définition de la polarisation. — Polariscopes.

2334. Définition de la polarisation. — Quand un faisceau de lumière émanant d'un centre lumineux par lui-même, parcourt un milieu homogène, sans rencontrer d'obstacle, il présente de tous les côtés les mêmes propriétés; si on le suppose vertical, on ne trouvera aucune différence dans ses propriétés du côté du nord, du sud, de l'est, etc. La lumière qui forme un pareil faisceau

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 171.

est dite *lumière naturelle* ou *neutre*. Mais quand ce faisceau a rencontré des obstacles, s'est réfléchi, a traversé des milieux cristallisés, il présente ensuite généralement des propriétés différentes sur ses divers côtés. Par exemple, si on le fait tomber obliquement sur un miroir de verre, et qu'on fasse tourner ce miroir autour du rayon, en ayant soin de ne pas faire varier l'angle d'incidence, l'intensité du faisceau réfléchi change en même temps que le côté auquel se présente la surface du miroir. Du reste, toutes les propriétés des rayons polarisés ne se manifestent jamais par des changements de direction; elles sont toutes relatives à des changements d'intensité ou à des modifications de couleur. L'étude des phénomènes où il y a coloration sera l'objet d'un chapitre particulier.

Les appareils avec lesquels on reconnaît que la lumière est polarisée se nomment *polariscopes* ou *analyseurs*. Nous allons en décrire plusieurs, et faire connaître les caractères principaux de la lumière polarisée.

2335. Polariscope réflecteur. — Ce polariscope dû à Malus, consiste simplement en un miroir non métallique, en verre noir par exemple, ou en obsidienne, *mn* (*fig.* 1703), soutenu par un anneau *a*, qu'on ajuste à un tube muni de diaphragmes, par lequel arrive le faisceau *polarisé s*. Le miroir étant incliné par rapport à ce faisceau, on fait tourner l'anneau sur lui-même, et l'on voit les rayons réfléchis *r* changer d'intensité avec la position du miroir. Parmi ces positions, il faut en remarquer deux pour lesquelles l'intensité des rayons réfléchis est *maximum* et a la même valeur. Ces deux positions diffèrent de 180°, de sorte que le plan de réflexion est le même pour l'une et l'autre. Si l'on fait tourner l'anneau, de 90° dans un sens ou dans l'autre en partant des positions maximum, on obtient deux autres positions pour lesquelles l'intensité des rayons réfléchis est *minimum*. Entre le maximum et le minimum, l'intensité change graduellement et est toujours la même pour deux positions différant de 180°; d'où l'on conclut que les propriétés du faisceau polarisé sont les mêmes sur deux arêtes diamétralement opposées.

La différence entre le maximum et le minimum dépend de la substance du miroir, et, pour un même miroir, de l'angle d'incidence. Cette différence est la plus prononcée, avec un miroir de verre, quand le rayon fait un angle de 35° 25' avec la surface, ou quand l'angle d'incidence est de 54° 75'. Si le rayon réfléchi disparaît complétement dans les positions du *minimum*, on dit que le rayon incident est *entièrement polarisé*; dans le cas contraire, il n'est que *partiellement polarisé*.

Plan de polarisation. — Le plan d'incidence, quand l'intensité du rayon réfléchi est *maximum*, se nomme *plan de polarisation* du rayon. On dit donc que le rayon est *polarisé dans le plan d'incidence*, quand l'éclat du rayon réfléchi est *maximum*, et perpendiculairement au plan d'incidence, quand l'éclat de ce rayon est *minimum*.

Analyseur de M. Delezenne. — Le rayon réfléchi décrivant un cône autour du rayon incident, l'observateur doit tourner avec ce rayon réfléchi

pour en observer l'intensité, ce qui est très incommode. M. Delezenne a imaginé un petit appareil qui ne présente pas cet inconvénient. Lo miroir en verre noir est fixé en *m* (*fig.* 1704), où il forme un angle de 35° 25′ avec l'axe du tube AB. Le rayon polarisé est réfléchi en *m*, entre perpendiculairement dans un prisme de verre P, où il éprouve la réflexion totale, et sort perpendiculairement par une autre face, où l'œil peut le recevoir, sans déplacement sensible, pendant qu'on fait tourner le tube sur lui-méme.

2336. Piles de glaces. — Cet instrument, nommé aussi *polariscope de réfraction*, consiste en un grand nombre de glaces trés minces et à faces bien paralléles, empilées les unes sur les autres dans un cadre métallique et inclinées de 35° 25′ sur le rayon polarisé, autour duquel la pile peut tourner. Le rayon transmis à travers les lames de verre, change d'intensité quand on fait tourner la pile, et l'on trouve que le *maximum* d'éclat se montre quand le plan d'incidence sur la pile est perpendiculaire au *plan de polarisa-*

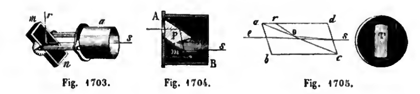


Fig. 1703. Fig. 1704. Fig. 1705.

tion. Le rayon est donc polarisé perpendiculairement au plan d'incidence quand il y a maximum d'intensité dans le rayon transmis. La figure 1703 représente la disposition qu'on donne ordinairement à l'instrument; il n'y a qu'à supposer qu'on ait remplacé le miroir *mn* par la pile de glaces.

2337. Polariscopes bi-réfringents. — Un cristal de spath d'Islande constitue un véritable polariscope. Si l'on fait passer un rayon polarisé à travers ce cristal, et qu'on le fasse tourner sur lui-même, on remarque que le *rayon ordinaire* s'affaiblit graduellement, pendant que l'autre augmente d'intensité. Le *maximum* a lieu, pour le *rayon ordinaire*, quand le plan de polarisation passe par la section principale du cristal; alors a lieu le *minimum* du *rayon extraordinaire*, et *vice versâ*.

Prisme bi-réfringent. — La bifurcation du rayon dans le prisme bi-réfringent est très incommode, à cause de la difficulté de distinguer le rayon ordinaire du rayon extraordinaire, et par suite de déterminer la position du plan de polarisation. On peut employer alors un prisme bi-réfringent a ‹ matisé, ayant ses arêtes parallèles à l'axe. Les deux rayons sont assez écartés l'un de l'autre pour que l'un d'eux soit intercepté au moyen d'un écran, quand on les observe à une distance suffisante.

Prisme de Nicol. — M. Nicol se débarrasse d'un des rayons, par un artifice trés ingénieux. Il prend un rhomboèdre de spath d'Islande, de 27^{mm} de longueur, et de 9^{mm} de largeur et d'épaisseur, *abcd* (*fig.* 1705), le scie en

deux suivant les deux grandes diagonales, et replace les deux fragments dans leur première position, en les collant au moyen de *beaume de Canada*, dont l'indice de réfaction 1,549, est compris entre les indices des rayons ordinaire et extraordinaire. Si l'on fait arriver un rayon *s* dans le sens de la longueur du prisme, le rayon ordinaire éprouve la réflexion totale en *o*, à la surface *ac* du beaume de Canada, et il ne passe que le rayon *extraordinaire e*. La position du plan de polarisation est alors celle que prend la section principale quand ce rayon présente son *minimum* d'intensité ; le rayon incident est donc polarisé dans la section principale ainsi placée.

Propriétés de la tourmaline. — La tourmaline est un cristal à un axe, présentant ordinairement la forme d'un prisme à six pans. Elle posséde la singuliére propriété d'absorber fortement le rayon ordinaire ; de sorte que, sous une certaine épaisseur, elle ne laisse passer que le rayon *extraordinaire*. Pour mettre en évidence cette propriété, découverte par Biot en 1815, on taille une tourmaline en forme de prisme à angle trés aigu et ayant ses arêtes paralléles à l'axe. Si l'on regarde un objet à travers la partie la plus mince, on aperçoit deux images ; mais si l'on regarde à une certaine distance du sommet, on ne voit plus que l'image extraordinaire. Une plaque de tourmaline taillée parallélement à l'axe, peut donc remplacer le prisme de Nicol ; et, comme dans ce dernier, le rayon est polarisé dans le plan principal, ou parallèlement à l'axe, quand la lumiére passe avec le moins d'éclat. Les tourmalines sont colorées, ce qui est un inconvénient quand on veut observer des phénoménes de coloration. — M. Hérapath a découvert un sel de quinine qui peut remplacer avantageusement la tourmaline, car il intercepte le rayon ordinaire, même sous une très petite épaisseur.

Il est à remarquer que les polariscopes qui précèdent peuvent servir de *polarisateurs*, c'est-à-dire qu'ils impriment à la lumiére naturelle qui les traverse toutes les propriétés qui constituent la polarisation.

Polariscope d'Arago ou à lunules. — Quand la lumière est faiblement polarisée, les changements d'intensité observés avec les polariscopes précédents sont difficiles à distinguer. On emploie alors le polariscope d'Arago, composé d'un tube à diaphragme dont une extrémité est fermée par une lame de *cristal* de roche de 5^{mm} environ d'épaisseur prise perpendiculairement à l'axe, et l'autre fermée par un prisme bi-réfringent et à laquelle on applique l'œil. Quand la lumière reçue dans l'instrument est *naturelle*, on aperçoit deux images *blanches* de l'ouverture du diaphragme ; mais pour peu que cette lumiére soit polarisée, les images présentent des couleurs complémentaires, qui changent quand on fait tourner l'appareil sur lui-même. Nous verrons plus tard la cause de ces couleurs.

Nous aurons occasion de décrire d'autres *polariscopes* trés sensibles. Ceux qui précèdent suffisent pour que nous puissions commencer immédiatement l'étude de la lumière polarisée.

2338. Découverte de la polarisation. — Les premiers phénomènes de

polarisation ont été observés par Huyghens dans les faisceaux réfractés par le spath d'Islande. Il reconnut que, si l'on reçoit l'un de ces faisceaux sur un second spath, il se bifurque; et si l'on fait tourner le cristal sur lui-même, les faisceaux ordinaire et extraordinaire obtenus changent graduellement d'intensité, le premier prenant un maximum d'éclat quand le second disparaît complétement, et réciproquement. Ces faits, que nous étudierons en détail, prouvent que les faisceaux qui ont traversé le premier spath ont contracté des propriétés nouvelles qui les rendent plus ou moins transmissibles à travers le second, suivant la manière dont sa section principale est orientée par rapport à deux arêtes opposées du faisceau. Pour expliquer ce phénomène, Newton supposa que les particules lumineuses possèdent des *pôles* opposés jouissant de propriétés différentes. Ces pôles sont tournés de toutes les manières dans les particules d'un rayon de lumière naturelle; mais quand le rayon est *polarisé*, toutes les particules ont le même pôle tourné du même côté, dans une direction perpendiculaire au rayon.

Le fait de polarisation de la lumière dans la double réfraction n'offrait qu'un intérêt restreint, parce qu'il était isolé, lorsque, en 1808, Malus découvrit que la réflexion imprime aux rayons lumineux toutes les propriétés qui constituent la polarisation. Ayant regardé par hasard à travers un spath d'Islande, l'image du soleil couchant réfléchie par les vitres du palais du Luxembourg, il remarqua qu'en faisant tourner le prisme, ces images changeaient d'intensité; l'une s'affaiblissait pendant que l'autre augmentait d'éclat. Les rayons réfléchis étaient donc polarisés. Plus tard, Malus, Biot et M. Brewster, chacun de leur côté, découvrirent que la réfraction simple peut aussi polariser la lumière. Malus expliqua ces phénomènes, au moyen de l'hypothèse de Newton, et créa le mot de *polarisation*, qui découle de l'explication qu'il adoptait. On reconnut alors que la polarisation est un phénomène général, que la lumière polarisée est beaucoup plus commune que celle qui ne l'est pas, et, à partir de cette époque mémorable dans l'histoire des sciences, les découvertes se succédèrent avec rapidité entre les mains des Arago, des Biot, des Brewster.... Une nouvelle branche d'optique fut créée, et Fresnel put établir sur des bases solides cette magnifique théorie de la polarisation et de la double réfraction, à laquelle les géomètres ont apporté le secours de leurs savants calculs, et que les découvertes dont l'optique s'enrichit chaque jour ne font que confirmer.

II. Explication de la polarisation, dans le système des ondulations.

2339. L'existence de rayons possédant des propriétés différentes sur leurs divers côtés, paraissait à Newton une objection décisive contre le système des ondulations, « car, disait-il, des pressions ou des mouvements propagés d'un corps lumineux, doivent être égaux de tous côtés : au lieu qu'il paraît,

par les expériences faites sur deux cristaux, que les différents côtés des rayons de lumière n'ont pas les mêmes propriétés ; » et Huyghens fut forcé de convenir de l'impuissance où il était de rendre compte de ce fait dans le système des ondulations. C'est qu'alors on ne concevait pas, dans l'éther, d'autre mode de vibration que celui dans lequel les mouvements sont dirigés suivant la ligne de propagation ; mais depuis, des expériences concluantes, et les progrés de la mécanique analytique, ont conduit à admettre des mouvements vibratoires perpendiculaires à cette ligne. Alors tout devient simple, et la polarisation découle naturellement de l'existence des ondes lumineuses. *Un rayon naturel* est un rayon dans lequel les mouvements vibratoires se font dans la surface de l'onde, successivement dans toutes les directions ; et un *rayon polarisé* est celui dans lequel ces vibrations se succédent toutes dans un seul et même plan, d'où dépend la position du *plan de polarisation*. Tel est le point de départ de la théorie de Fresnel.

On voit qu'il faut commencer par prouver que les vibrations de l'éther se font parallèlement à la surface de l'onde. Déjà, dés 1672, R. Hooke énonçait ce principe comme une simple hypothése, et sans y être conduit par les phénoménes de la polarisation. Fresnel y a été conduit par l'examen des faits, par ce qui se passe quand un rayon polarisé traverse un cristal à un axe. Il résulte d'une loi de Malus, que nous exposerons plus loin, que les vitesses de vibration des particules d'éther dans le rayon ordinaire, sont proportionnelles à $\cos \alpha$, et dans le rayon extraordinaire, à $\sin \alpha$, α étant l'angle du plan de polarisation avec la section principale du cristal. La vitesse de vibration du rayon incident semble donc se décomposer en deux autres, suivant la régle du parallélogramme, comme si chaque vitesse d'oscillation, supposée perpendiculaire au rayon, se décomposait en deux autres, l'une dans la section principale, l'autre perpendiculaire à ce plan ; ce qui conduit à supposer que les mouvements oscillatoires se font transversalement au rayon. Voici les expériences par lesquelles Fresnel et Arago ont cherché à prouver cette loi.

2340. Les vibrations de l'éther sont transversales au rayon. — Si les vibrations de l'éther s'accomplissaient longitudinalement, comme celles de l'air dans le phénomène du son, les interférences devraient avoir lieu, quelles que fussent les lames minces interposées dans le trajet des rayons qui interfèrent. Si, au contraire, les vibrations sont perpendiculaires au rayon, et si des lames interposées dirigent dans le même plan toutes celles d'un même rayon, il faudra, pour qu'il y ait destruction des mouvements ondulatoires, que ces mouvements aient lieu dans le même plan pour les deux rayons ; car s'ils s'accomplissaient dans des plans inclinés l'un sur l'autre, ils produiraient en chaque point du rayon une résultante, donnée par la régle du parallélogramme des vitesses, et qui ne pourrait jamais être nulle. Deux rayons polarisés dans des plans différents ne devront donc pas donner d'obscurité complète par interférence ; et quand ces plans seront perpendiculaires l'un à l'autre, ils ne

pourront pas même donner ces inégalités d'intensité qui forment les franges d'interférence. C'est, en effet, ce qui a été constaté par Fresnel et Arago.

Lors de ses essais sur les mesures des indices de réfraction par les interférences (2236), Arago eut l'idée de chercher quelle serait l'influence que pourrait avoir sur les résultats, l'état de polarisation des rayons, et il se mit aussitôt à l'œuvre avec Fresnel. Ils reconnurent d'abord facilement, que l'expérience des franges dans l'ombre d'un corps étroit, réussit trés bien en employant de la lumière polarisée dans le même plan. Ils essayérent ensuite les deux faisceaux ordinaire et extraordinaire sortant d'un spath d'Islande placé devant le focus fourni par une lentille. L'expérience prouve que ces deux faisceaux sont polarisés dans des plans perpendiculaires entre eux. Les ayant séparés par l'écran étroit, ils n'obtinrent aucune frange dans l'ombre géométrique. Comme on pourrait attribuer ce résultat négatif à l'inégalité de vitesse des deux faisceaux dans le spath, Fresnel et Arago ont employé d'autres méthodes parmi lesquelles nous citerons les suivantes [1] :

1° On répète l'expérience d'Young (2221), en polarisant la lumière qui passe par les fentes. Si les deux faisceaux sont polarisés dans le même plan, on obtient des franges comme avec la lumière naturelle ; s'ils sont polarisés dans des plans perpendiculaires, les franges disparaissent. Pour se procurer des rayons polarisés, on recouvre les fentes, de deux fragments pris dans une même lame de tourmaline parallèle à l'axe, lame qui polarise la lumière dans un plan perpendiculaire à cet axe. Si les deux fragments ont leurs axes parallèles, il y a interférence ; et si ces axes sont perpendiculaires, les franges disparaissent. Dans les positions intermédiaires, les franges se manifestent, mais d'autant plus faibles que les plans de polarisation sont plus prés d'être perpendiculaires l'un à l'autre.

Au lieu de tourmalines, on peut employer deux petites *piles* de glaces égales (2336), formées de feuilles de mica. Si on les incline suffisamment au-dessus des fentes, la lumière qui les traverse est presque entièrement polarisée dans un plan normal au plan d'incidence ; et les franges disparaissent quand les deux plans d'incidence sont perpendiculaires.

2° On applique sur les deux fentes, deux fragments d'une même lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche parallèle à l'axe. Chaque lame donne un rayon ordinaire et un rayon extraordinaire, polarisés dans des plans perpendiculaires. Si les axes des deux fragments sont parallèles, les rayons ordinaires des deux lames donnent des franges, comme la lumière naturelle ; il en est de même des rayons extraordinaires, et ces deux systèmes de franges se superposent. Si l'on fait tourner peu à peu l'une des lames, on voit ces franges s'affaiblir et disparaître, pour être remplacées par de la lumière uniforme quand les axes sont perpendiculaires. En même temps, on voit apparaître

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. X, p. 290.

latéralement d'autres systémes de franges, qui sont le résultat de la combinaison des rayons ordinaires venant d'une des fentes, avec les rayons extraordinaires venant de l'autre, et elles sont transportées latéralement, à cause de la différence de vitesse de ces rayons dans le cristal. Tant que les axes des deux lames restent parallèles, les rayons ordinaire de l'une et extraordinaire de l'autre se trouvent polarisés dans des plans perpendiculaires, et les franges latérales ne se forment pas. Mais quand on incline les axes des deux lames, ces franges apparaissent, de plus en plus brillantes, et prennent leur maximum d'éclat quand ces axes sont perpendiculaires. — Comme le sulfate de chaux et le cristal de roche sont positifs, le rayon extraordinaire possède la vitesse la plus petite ; les franges d'un côté sont donc produites par le rayon extraordinaire de la lame qui est du même côté, avec le rayon ordinaire venant de la lame opposée.

3° On partage en deux une plaque de spath d'Islande, et l'on pose les deux fragments l'un sur l'autre, de manière que les rayons partis d'un point lumineux les traversent successivement. La première plaque donne deux faisceaux qui se bifurquent, en général, dans la seconde, en formant ainsi quatre faisceaux. Mais si les deux plaques ont leur section principale perpendiculaire l'une à l'autre, il n'y a plus que deux faisceaux ; le faisceau ordinaire produit par l'*extraordinaire* de la première plaque, et le faisceau extraordinaire provenant du faisceau *ordinaire* de cette première plaque. Ces rayons, en sortant des deux plaques, auront donc éprouvé les mêmes changements de vitesse, et se trouveront dans le même cas que s'ils avaient traversé une même plaque homogène ; ils devraient donc former des franges, si les vibrations de l'éther étaient longitudinales. Or, on n'obtient pas de franges ; c'est que les deux faisceaux sont polarisés à angle droit.

Dans l'expérience des miroirs de Fresnel, les rayons sont polarisés par réflexion dans le même plan ; et dans celle d'Young, ces rayons étant fournis par une même source, ont à chaque instant leurs ondulations transversales parallèles, de manière à pouvoir interférer.

2341. Les mouvements vibratoires sont perpendiculaires au plan de polarisation. — Il résulte des expériences qui précèdent que les vibrations de l'éther sont parallèles à la surface de l'onde, et que, dans un rayon polarisé, elles s'accomplissent pour la plupart dans un même plan passant par ce rayon. Ce plan se nomme le *plan du rayon* ; il doit évidemment avoir une position déterminée par rapport au *plan de polarisation*. Il est facile de voir que ces deux plans sont perpendiculaires l'un à l'autre, c'est-à-dire que les vibrations ont lieu perpendiculairement au plan de polarisation. En effet, l'expérience prouve que le rayon *ordinaire* sortant d'un cristal à un axe, est polarisé dans la section principale. Or, ce rayon ayant une vitesse constante dans toutes les directions, puisqu'il suit les lois de Descartes, les vibrations de l'éther doivent y avoir une direction constante par rapport à l'axe du cristal ; et comme elles sont perpendiculaires au rayon, quel que soit l'angle qu'il fait

avec l'axe, elles ne pourront former un angle constant avec ce dernier, qu'autant qu'elles lui seront perpendiculaires. Les vibrations sont donc perpendiculaires à la fois au rayon et à l'axe, et par conséquent à la section principale, qui se confond ici avec le plan de polarisation. Comme tous les rayons polarisés, quelle que soit la cause qui les a polarisés, jouissent des mêmes propriétés, il est démontré par ce qui précède que les vibrations de l'éther sont toujours perpendiculaires au plan de polarisation.

Ce résultat peut encore se déduire des propriétés de la tourmaline, qui intercepte le rayon ordinaire (1337). Il résulte de l'expérience, qu'une lame de tourmaline *perpendiculaire à l'axe*, arrête toute la lumière incidente normale ; ce qui prouve que les vibrations perpendiculaires à l'axe sont anéanties. Quand le rayon traverse une lame *parallèle à l'axe*, le rayon ordinaire est seul intercepté ; il faut donc que ses vibrations soient encore perpendiculaires à l'axe, et, par conséquent, à la section principale, dans laquelle il est polarisé.

Il résulte de cette direction des mouvements vibratoires, qu'un rayon polarisé se réfléchit le plus facilement quand ses vibrations sont parallèles à la surface réfléchissante ; il pénètre, au contraire, plus librement à travers une pile de glaces, quand les mouvements s'accomplissent dans le plan d'incidence, et ils traversent le plus complètement une tourmaline parallèle à l'axe, quand les vibrations sont parallèles à cet axe. La tourmaline se comporte ici comme un grillage, qui livre passage à une lame dirigée parallèlement aux barreaux, et qui l'arrête quand elle se présente transversalement.

2342. Origine et propagation des vibrations transversales. — Voyons maintenant comment on peut se rendre compte de l'origine et de la propagation des vibrations transversales. Quand une molécule d'éther est ébranlée dans une direction quelconque, cette direction est, en général, oblique à la ligne qui la joint à la molécule la plus voisine ; et la vitesse de ce mouvement peut se décomposer en trois autres vitesses rectangulaires, l'une suivant la plus courte distance à la molécule voisine, et dirigée dans le sens de la propagation, les deux autres perpendiculaires à la première. Les mouvements longitudinaux se propagent par des condensations et des dilatations ; ce sont ceux qui engendrent le son, quand il s'agit des milieux pondérables. Les deux autres se propagent sans condensation ni dilatation, ils ne produisent aucun effet sur l'oreille ; mais quand il s'agit de l'éther, ils engendrent la lumière. Quant aux vibrations longitudinales de l'éther, elles n'agissent pas sur la rétine. On peut se représenter les vibrations dans le sens de la propagation, par ce qui se passe dans une corde tendue vibrant longitudinalement, et les vibrations transversales par celles qui animent la corde quand elle vibre transversalement. — L'analyse mathématique a conduit à ces résultats. Les équations aux différences partielles par lesquelles on représente les petits mouvements des particules d'un milieu élastique, indiquent deux espèces de vibrations, les unes dans le sens de la propagation, les autres perpendiculaires. Les mouvements longitudinaux se propagent deux fois plus vite que les autres.

Nous avons vu, dans l'acoustique, comment Wertheim a reconnu l'existence des deux systèmes d'ondes, dans certains milieux pondérables (I,662).

Il est facile de se rendre compte du mode de transmission des vibrations qui sont transversales à la direction de la propagation. Considérons plusieurs files indéfinies de molécules d'éther en équilibre, perpendiculaires au sens de la propagation. Ces molécules sont distribuées régulièrement, et équidistantes, dans les milieux homogènes. Si la première file est déplacée très peu dans le sens de sa longueur, les distances des molécules qui la composent à celles de la file voisine sont modifiées. Ces dernières vont donc se déplacer dans le même sens pour rétablir l'égalité de distance, et celles de la troisième file vont obéir aux mêmes influences et se déplacer à leur tour, et ainsi de suite. Pendant ce temps-là, les molécules de la première file reviennent à leur position d'équilibre, par l'effet de la cause qui excite les vibrations. Elles tendraient à dépasser cette position, mais les molécules de la file suivante déplacées réagissent et détruisent la vitesse acquise; puis elles obéissent à leur tour à l'action de celles de la première, reviennent à la position d'équilibre, où la troisième les arrête, et ainsi de suite. On voit que les mouvements s'accompliront sans changement de densité, et que tout rentrera à l'état de repos, à moins que de nouvelles oscillations ne soient imprimées à la première file, par la cause qui excite la lumière. Les diverses molécules situées sur la direction de la propagation seront alors dans différents états de déplacement par rapport à cette droite, ou dans différentes phases de leur oscillation complète. On pourra représenter ces déplacements latéraux par des ordonnées, comme en acoustique; seulement, ici, ces ordonnées représenteront les déplacements réels, et non plus des condensations ou dilatations.

§ 2. — POLARISATION PAR RÉFLEXION, ET RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

I. Lois de la polarisation par réflexion.

2343. Mode d'observation. — Quand un faisceau de lumière se réfléchit obliquement sur un corps poli non métallique, comme le verre, le marbre, l'obsidienne, le bois verni, etc., etc., ce rayon se polarise dans le plan d'incidence; c'est-à-dire que les mouvements vibratoires qui, dans le rayon incident, s'accomplissaient suivant toutes les directions perpendiculaires au rayon, s'exécutent, pour le plus grand nombre, dans le rayon réfléchi, perpendiculairement au plan de réflexion (2341). C'est ce qu'on peut constater au moyen des divers *polariscopes* que nous avons décrits.

Appareil de Biot. — Les expériences se font ordinairement au moyen de l'appareil de Biot (*fig.* 1706). AB est un tuyau noirci en dedans, et contenant des diaphragmes destinés à ne laisser passer que des rayons sensiblement

parallèles. En *m*, est un cadre dans lequel on fixe les lames polies destinées à polariser la lumière par réflexion. On peut incliner plus ou moins la lame par rapport à l'axe du tube, et mesurer l'angle qu'elle forme avec cet axe, au moyen de l'arc divisé *a*. A l'extrémité A du tube s'ajuste le polariscope *p*, qu'on peut faire tourner autour de l'axe du tube, de quantités mesurées au moyen d'un cercle divisé A et d'un index fixe *i*. On a représenté dans la figure le polariscope de réflexion; *n* est un anneau destiné à recevoir des lames transparentes, pour certaines expériences dont nous parlerons plus tard (2415).

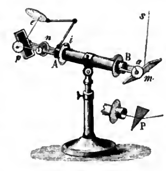


Fig. 1706.

Quand on reçoit sur le polariscope *p*, la lumière des nues, ou d'une lampe, réfléchie par la plaque *m*, on trouve qu'il y a *maximum* d'éclat quand les plans de réflexion en *m* et *p* coïncident, ce qui a lieu dans deux positions opposées du miroir *p*. Quand ce dernier est tourné de manière que les deux plans de réflexion soient perpendiculaires, on a le *minimum* d'éclat.

M. Guérard montre d'un seul coup d'œil les différentes intensités du faisceau réfléchi par le polariscope dans différents azimuts. Il reçoit ce faisceau polarisé, sur le sommet d'un cône en verre noir, et dans une direction parallèle à l'axe de ce cône, dont l'angle au sommet est égal à deux fois 35° 25′. La lumière réfléchie sur toutes les arêtes du cône, forme sur un écran parallèle à sa base, un cercle lumineux ayant son centre sur l'axe, et présentant deux maximum opposés qui indiquent le plan de polarisation du faisceau incident, et deux minimum situés à 90° des maximum, et entre lesquels l'éclat varie graduellement.

Avec une tourmaline ou un prisme de Nicol, le *minimum* du rayon polarisé par la réflexion se montre quand les sections principales des polariscopes sont *parallèles* au plan de réflexion en *m*; c'est donc bien dans ce plan que la lumière est polarisée par la réflexion.

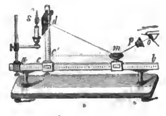
2344. Angle de polarisation. — Quand le polariscope est tourné de manière que le rayon polarisé par réflexion présente son minimum d'intensité, on remarque que ce minimum change de valeur avec l'angle d'incidence sur la surface réfléchissante *m* (*fig.* 1706). Quand la position du miroir *m* est telle que l'éclat soit le plus petit possible, l'angle d'incidence se nomme l'*angle de polarisation* de la substance de ce miroir [1]. Quand le rayon réfléchi peut être totalement éteint par le polarisateur, on dit qu'il est *complètement polarisé*. Cela n'a jamais lieu que sous l'angle de polarisation, et quand la

[1] Certains auteurs prennent pour angle de polarisation l'angle formé par le rayon avec la surface, supposée plane. Nous considérerons toujours ici l'angle formé avec la normale.

lumière n'est pas trop vive. Ainsi, quand on reçoit les rayons solaires sur le miroir *m*, qui les polarise, il passe toujours un peu de lumière dans la position du polariscope qui donne le minimum, même quand l'incidence en *m* est l'angle de polarisation. Dans ce cas, on peut recevoir sur un écran *e* qui tourne avec le polariscope de réflexion, le faisceau qu'il réfléchit ; ce qui dispense de déplacer l'œil.

Il est à remarquer aussi que l'angle d'incidence sur le miroir polariscope, doit être égal à l'angle de polarisation de la substance dont il est formé, quand on veut obtenir la plus grande différence entre le maximum et le minimum d'intensité du rayon polarisé qu'il sert à explorer.

L'angle de polarisation n'est pas le même pour toutes les substances ; on peut le montrer au moyen d'une expérience curieuse de M. Brewster : on place une plaque de verre noir en *m* (*fig.* 1706), de manière à voir disparaître toute lumière dans le polariscope quelconque placé en *p*. Si l'on souffle ensuite son haleine sur la plaque, la lumière apparaît ; la réflexion se faisant alors sur de l'eau, dont l'angle de polarisation est moindre que celui du verre.



Fgi. 1707.

2345. Mesure de l'angle de polarisation. — Dans le cas des substances solides, on en forme une plaque qu'on ajuste dans le cadre *m*, on place le polariscope *p* de manière à avoir le plus faible éclat, et l'on incline peu à peu le cadre *m*, jusqu'à ce que l'image présente son minimum d'éclat. L'angle de polarisation est alors donné par le cercle divisé *a*.

Dans le cas des liquides, on peut se contenter de mouiller la surface d'une plaque de verre noir. Mais Biot a employé un moyen plus sûr : le liquide est placé dans une petite coupe *m* (*fig.* 1707) mobile sur une règle horizontale divisée *ab*. Une autre règle divisée *cd*, perpendiculaire à la première, est fixée à un curseur *c*, qui peut glisser sur la règle *ab*. Elle porte un écran mobile *d*, percé d'un trou par lequel passe un pinceau de rayons lumineux fournis par une bougie *s*. Ce faisceau est réfléchi par la surface du liquide *m*, et reçu dans un polariscope *p*. On fait varier l'angle d'incidence, en déplaçant le vase, jusqu'à ce que le rayon réfléchi soit le plus complètement polarisé. L'angle de polarisation *p* est alors donné par la formule cotang $p = \overline{dc'} : \overline{mc'}$. Voici les principaux résultats trouvés par divers physiciens, particulièrement par Arago et par Biot :

NOMS des SUBSTANCES.	ANGLE de polarisation.	ANGLE avec la surface.	NOMS des SUBSTANCES.	ANGLE de polarisation.	ANGLE avec la surface.
Spath fluor.........	54° 50′	40° 0′	Topaze.............	58° 40′	31° 20′
Eau.................	52 45	37 15	Spath d'Islande.....	58 23	31 37
Verre..............	54 35	35 25	Rubis spinelle......	*60 16	29 44
Obsidienne.........	56 03	33 57	Zircon..............	*63 08	26 52
Sulfate de chaux...	56 28	33 32	Soufre natif........	*64 10	25 50
Ambre..............	56 35	33 25	Verre d'antimoine..	*64 45	55 15
Cristal de roche....	57 22	32 38	Chromate de plomb.	*67 42	22 18
Sulfate de baryte..	58 0	32 0	Diamant............	*68 02	21 58

2346. Loi de Brewster. — Malus avait cherché en vain une relation entre l'angle de polarisation et l'indice de réfraction. M. Brewster, après avoir comparé un grand nombre de résultats d'expérience, a découvert, en 1814, cette loi simple et élégante : *la tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction de la substance réfléchissante.* Cet énoncé peut être remplacé par la formule géométrique suivante : *lorsqu'un rayon se réfléchit sous l'angle de polarisation p, le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.* En effet, nous avons (*fig.* 1708) $\tang p = n$; or, $n = \frac{\sin p}{\sin r}$. Il faut donc que l'on ait $\sin r = \cos p$, c'est-à-dire que l'angle *r* soit complémentaire de l'angle *p*, et par conséquent que l'angle *r*IE soit droit.

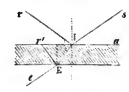


Fig. 1708.

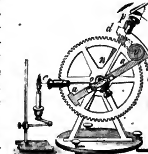


Fig. 1709.

Parmi les nombreuses expériences faites pour contrôler la loi de Brewster, nous citerons celles de M. Seebeck, qui ont été faites avec beaucoup d'exactitude, au moyen d'un appareil qui simplifie beaucoup l'expérience. Cet appareil consiste en un cercle gradué fixe portant un collimateur *c*, à travers lequel passe un pinceau de rayons lumineux. Ce pinceau se réfléchit sur la surface polarisante *o*, fixée, au centre, à une alidade *aa*, de manière à être parallèle au bord de l'alidade et perpendiculaire au plan du limbe. Le rayon

réfléchi est reçu dans un polariscope *p* , fixé à une seconde alidade *pn*. Un pignon denté *v*, fixé à l'alidade *aa*, et engagé dans les dents du cercle fixe, fait mouvoir cette alidade, et agit en même temps sur un arc denté *dd*, auquel est fixé le polariscope *p*. Il résulte de cette disposition que, si l'alidade *aa* se rapproche de la direction du rayon incident *co*, d'une quantité correspondante à *n* dents, l'alidade *pn* se rapprochera aussi de *aa*, de cette même quantité; de manière que le rayon réfléchi passera toujours par le polariscope *p*.

M. Seebeck trouva d'abord des résultats différant notablement de ceux que donne la loi de Brewster; mais cela tenait à ce que les surfaces polies s'altèrent avec une grande rapidité, par ce dépôt de matières grasses, qui nous a servi à expliquer les images de Moser (2080). M. Seebeck trouva plus tard un accord satisfaisant, en opérant sur des surfaces récemment polies. — M. Brewster avait aussi, antérieurement, constaté des anomalies singulières en opérant avec le verre, et il en avait aussi trouvé la cause dans les matières qui en ternissent rapidement la surface.

2347. Remarques. — 1° Il y a très peu de substances capables de polariser entièrement la lumière par réflexion, et si l'on a cru longtemps le contraire, c'est qu'on opère ordinairement sur de la lumière peu intense. Ce sont les corps qui ont un grand indice de réfraction qui polarisent le moins. Suivant M. Brewster, il faudrait que l'indice fût moindre que 1,7 pour qu'il pût y avoir polarisation complète. On a marqué d'un astérisque, dans le tableau ci-dessus, les substances qui ne sont pas dans ce cas. Mais même au-dessous du nombre 1,7, la polarisation ne peut être complète, quand les rayons sont intenses. En général, les substances qui réfléchissent peu de lumière en polarisent une grande proportion. Les métaux à surface polie et nette polarisent à peine; ce qui permet de reconnaître facilement, avec le polariscope, la présence d'un vernis à leur surface. Dans tous les cas, la loi de Brewster s'applique à l'incidence sous laquelle le faisceau réfléchi contient la plus grande proportion de lumière polarisée.

2° Les indices de réfraction des divers rayons colorés étant différents, l'angle de polarisation de ces rayons ne doit pas être le même. On devrait donc, avec la lumière blanche, obtenir successivement les couleurs du spectre, en inclinant légèrement le miroir dans le voisinage de l'angle de polarisation. C'est, en effet, ce qui a lieu d'une manière sensible avec les corps qui ont un grand pouvoir dispersif, comme l'huile de cassia, le diamant, le chromate de plomb, le fer spéculaire. Si le phénomène n'est pas sensible avec les autres substances, c'est que leur pouvoir dispersif est faible. Avec l'eau et le verre, les angles de polarisation des rayons extrêmes du spectre ne diffèrent que de 15′ et 20′. Cependant M. J. Herschel rend les couleurs sensibles, avec le verre, en plaçant en *m* et *p* (*fig.* 1706) des lames de verre, sur lesquelles il fait réfléchir les rayons solaires. L'angle d'incidence sur le premier miroir étant successivement un peu inférieur, égal, et un peu supérieur à l'angle de polarisation, il reçoit les rayons réfléchis, sur le second miroir *p*, sous une incidence

successivement inférieure, égale et supérieure à ce même angle, et obtient dans les neuf cas différents, diverses nuances bien caractérisées. Quand on fait réfléchir la lumière blanche sur un seul miroir, l'angle de polarisation correspond aux rayons jaunes, qui sont les plus brillants, et les teintes rouges et violettes qui tendraient à apparaître forment par leur mélange, de la lumière blanche. Il résulte de ces faits, qu'il ne devrait jamais y avoir extinction complète du rayon réfléchi; et c'est ce qu'on observe avec les rayons solaires. Si la lumière des nuées semble disparaître complètement, cela tient à ce que la portion qui se réfléchit est extrêmement faible. La grande dispersion des substances très réfringentes explique aussi pourquoi elles ne polarisent jamais entièrement.

3° Dans le tableau (2345), figurent des corps bi-réfringents. On doit se demander auquel des indices, *ordinaire* ou *extraordinaire*, s'applique la loi. M. Brewster a trouvé que l'angle de polarisation est différent sur les diverses faces du cristal bi-réfringent, et dans différentes directions sur une même face; mais qu'il y a toujours une direction où la polarisation n'est pas modifiée par la force qui produit la double réfraction, et où la tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction ordinaire [1].

2348. Mesure des indices de réfraction. — La loi de Brewster nous fournit un moyen précieux de mesurer l'indice de réfraction des substances qu'on n'a qu'en petits fragments : il suffit de leur donner une surface plane bien polie, et de mesurer l'angle de polarisation, par un des moyens que nous avons indiqués (2245). Cette méthode offre en outre la possibilité d'obtenir l'indice des substances opaques. Par exemple, l'angle de polarisation sur le mercure et l'acier, est d'environ 76° 30', et 71° ; ce qui donne pour les indices de ces métaux, les valeurs 4,16 et 2,85.

2349. Polarisation par réflexion à la seconde surface. — Malus a reconnu qu'un rayon tel que IE (*fig.* 1708), qui se réfléchit en E dans l'intérieur d'un milieu transparent, se polarise dans le plan d'incidence. Pour s'en assurer, il suffit d'observer au polariscope, le rayon Er' après son émergence en r'. Si sI forme avec la normale l'angle de polarisation, et si les faces du corps transparent sont parallèles, le rayon réfracté formera aussi avec la normale en E l'angle qui correspond à la polarisation maximum. Or, le rayon émergent Ee étant parallèle à sI, il est facile de voir que l'angle r'Ee est droit, comme l'angle EIr ; ce qui montre que la loi de Brewster est encore vraie dans le cas de la réflexion intérieure. Pour exprimer cette loi algébriquement, on écrira $\tang p' = 1 : n$, n étant l'indice, ou $\cot p' = n$. On voit aussi que p' n'est autre chose que l'angle de réfraction en I ; on a donc $\sin p = n \sin p'$, formule qui donne une relation entre les angles de polarisation par réflexion à l'extérieur et à l'intérieur du corps.

On pourrait attribuer une partie de la polarisation du rayon réfléchi en

[1] Brewster, *Manuel d'optique* (traduction française), t. I, p. 228.

dedans et émergent en r', à une action produite, soit à l'entrée du rayon en I, soit à sa sortie en r'. Pour éviter cette objection, Malus a d'abord constaté qu'un rayon normal à une surface, ne se polarise ni par réflexion, ni par réfraction, et qu'un rayon qui traverse un milieu, en entrant et sortant normalement, n'éprouve pas de modification dans sa polarisation. Il a ensuite taillé un prisme ABC (*fig.* 1710), dont les angles A et B étaient égaux à l'angle p' calculé au moyen de la formule $\cot p' = n$; puis, ayant fait tomber un rayon sE perpendiculairement à la face CA, ce rayon réfléchi en E a donné le rayon Er perpendiculaire à la face de sortie BC, et formant l'angle NEr égal à A ou à p'. Ce rayon s'est trouvé polarisé dans le plan de réflexion.

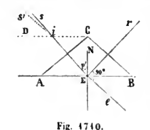


Fig. 1710.

Il n'y a pas de polarisation dans la *réflexion totale*, c'est-à-dire quand le rayon arrive en E en faisant avec la normale un angle égal ou supérieur à l'*angle limite*; mais il se produit dans ce cas des phénomènes particuliers sur lesquels nous reviendrons plus tard.

2350. Polarisation par réflexion diffuse. — La lumière réfléchie d'une manière diffuse par les surfaces imparfaitement polies est, en général, polarisée partiellement. Il suffit, pour le constater, de regarder à travers un polariscope, en se plaçant en dehors du plan de la réflexion spéculaire, une surface vivement éclairée, et de faire tourner le polariscope sur lui-même. On reconnaît facilement deux maximum et deux minimum à chaque tour. Arago a reconnu que la lumière diffusée *par les surfaces polies* est polarisée *perpendiculairement* au plan de réflexion considéré. Ainsi, quand on tourne autour du point d'incidence, on trouve toujours que la lumière reçue est polarisée perpendiculairement au plan normal passant par l'œil. Mais si, au lieu de surfaces polies, on emploie des surfaces *mates*, les résultats sont tout autres. MM. de la Provostaye et P. Desains ont reconnu que la polarisation a lieu alors dans le plan normal passant par l'œil [1]. Quand la lumière tombe *normalement* à une plaque de verre dépoli, de platine platiné ou recouvert de noir de fumée, la lumière diffusée dans tous les sens est polarisée dans le plan normal passant par l'œil, et d'autant plus que les rayons considérés sont plus écartés de la normale. Mais la céruse, le cinabre, le soufre lavé, ne paraissent imprimer aucune trace de polarisation à la lumière diffusée provenant d'un faisceau normal ; il faut que le faisceau incident forme un angle de plus de 30° avec la normale. Sous l'incidence de 70°, toutes les substances examinées ont donné dans la direction de la réflexion spéculaire, de la lumière polarisée dans le plan d'incidence. Si, l'incidence étant toujours de 70°, on explore les rayons diffus dans des directions différentes de celle de la réflexion spéculaire, mais

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 215.

en restant dans le plan d'incidence, on trouve que, pour le soufre, le cinabre et la céruse, les rayons diffus compris dans l'angle droit du côté du faisceau incident, ne sont pas polarisés. Si l'on part de la normale, dans l'angle droit opposé, la polarisation se montre bientôt et paraît atteindre un maximum dans la direction de la réflexion spéculaire. Avec le platine platiné, la polarisation existe dans les deux angles droits, mais elle est très faible dans celui qui contient le faisceau incident, et elle semble changer de plan quand les rayons diffusés sont très rapprochés de la surface.

MM. de la Provostaye et P. Desains ont vérifié le fait annoncé par Arago, que les rayons diffus réfléchis par les surfaces polies sont polarisés dans un plan *perpendiculaire* au plan de réflexion. Ils ont reconnu que, pour constater ce fait, il faut se placer à une certaine distance angulaire de la direction des rayons réfléchis spéculairement. En se rapprochant ensuite de celle-ci, on trouve d'un côté comme de l'autre, une direction pour laquelle il n'y a pas de polarisation ; entre ces deux directions neutres, le plan de polarisation se confond avec le plan de diffusion. Ces rayons neutres s'écartent à mesure que la surface est moins polie, de manière que l'on passe par degrés à ce qui a lieu pour les surfaces mates. Il est à remarquer que le poli n'est pas seul à avoir de l'influence sur ces phénomènes ; car certains corps bien polis peuvent se comporter à peu près comme les corps mats.

2351. Polarisation partielle par réflexion spéculaire. — Quand la lumière naturelle se réfléchit sous un angle différent de l'angle de polarisation, ou même sous cet angle, pour la plupart des substances, le faisceau réfléchi ne peut être éteint par les différents polariscopes : et il est dit *partiellement polarisé*. Malus, Arago et la plupart des physiciens considèrent un semblable faisceau comme composé de rayons naturels et de rayons totalement polarisés. De sorte que la polarisation n'admettrait pas de degrés ; un rayon élémentaire serait totalement ou nullement polarisé. Un polariscope peut l'arrêter dans le premier cas, et le laisser passer dans le second. Nous verrons plus loin que M. Brewster considère la lumière partiellement polarisée, sous un tout autre point de vue (2367).

Arago a reconnu par l'expérience, qu'à des distances angulaires égales, en deçà ou au-delà de l'angle de polarisation, la *proportion* de lumière polarisée dans le faisceau réfléchi est à très peu près la même. Par exemple, le verre de Saint-Gobain a donné la même proportion de lumière polarisée sous les angles de 65° 42′ et 7° 12′ ; 63° 54′ et 7° 55′ ; 60° 18′ et 11° 40′, comptés à partir de la surface. Les moyennes entre ces couples d'angles sont 36° 27′, 35° 55′, 35° 59′, qui diffèrent peu de l'angle de polarisation de ce verre, angle qui est d'environ 35°. L'eau a donné des résultats analogues. Pour ces sortes d'expériences, on se sert d'instruments que nous décrirons plus tard sous le nom de *polarimètres*, et qui font connaître la proportion de lumière polarisée contenue dans un faisceau. On peut tirer parti de la loi empirique d'Arago, pour trouver l'angle de polarisation maximum des substances qui polarisent

faiblement : on cherche deux angles pour lesquels la polarisation soit la même, et l'on en prend la moyenne ; ce qui est plus exact que de chercher le minimum, à cause des faibles variations d'intensité quand on en approche.

2352. Polarisation par réflexions successives. — M. Brewster a reconnu qu'on peut polariser entièrement un faisceau, au moyen de plusieurs réflexions sur des miroirs formés d'une substance incapable de polariser totalement sous aucun angle. Ces réflexions peuvent avoir lieu sous d'autres angles que celui de polarisation maximum ; mais il faut d'autant plus de réflexions, que ces angles diffèrent plus de ce dernier. Nous verrons comment la théorie rend compte de ces résultats.

Remarque. — Il ne faut pas confondre la *quantité absolue* de lumière polarisée, avec la *proportion* de cette lumière que contient un faisceau réfléchi. Par exemple, le verre réfléchit, sous l'angle de polarisation, 0,07 à 0,08 de la lumière incidente, et le faisceau réfléchi est entièrement polarisé. Si l'angle d'incidence augmente, la proportion de lumière réfléchie augmente aussi (1898), le faisceau réfléchi n'est plus totalement polarisé, et cependant il renferme une quantité de lumière polarisée plus grande que 0,08 de la lumière incidente. Il peut arriver, de même, que certaines substances douées d'un grand *pouvoir réflecteur* et ne polarisant qu'une faible proportion de lumière réfléchie, renvoient cependant plus de lumière polarisée que d'autres qui polarisent totalement, mais qui n'ont qu'un faible pouvoir réflecteur.

2353. Application de la polarisation par réflexion. — La polarisation que produit la réflexion, peut servir à reconnaître si les rayons qui partent d'un corps ont été réfléchis à sa surface. C'est ainsi qu'Arago a constaté que la lumière de la lune est polarisée par réflexion, quand elle est en croissant, de manière à nous envoyer obliquement ses rayons. C'est principalement dans les parties obscures, connues sous le nom de *mers*, que les signes de polarisation sont prononcés. — La lumière des comètes est aussi polarisée par réflexion ; d'où l'on peut conclure que cette lumière est, au moins en partie, empruntée au soleil et réfléchie.

La lumière de l'arc-en-ciel est polarisée dans le plan diamètral, et celle des halos, perpendiculairement à ce plan ; ce qui montre que la première est réfléchie et la seconde réfractée, comme nous le verrons plus loin (2368).

La polarisation a servi à Arago à reconnaître la nature de certaines pierres que l'on pensait être des diamants : on y tailla une petite facette, et, prenant l'angle de polarisation, on reconnut qu'il était le même que pour le diamant, et que la polarisation était incomplète, comme pour ce dernier.

2354. Polarisation de l'atmosphère. — Arago a découvert que la lumière que nous renvoie l'atmosphère par un temps serein, est fortement polarisée. Ce phénomène se constate facilement avec le polariscope à lunules. Quand on s'écarte du soleil, dans le plan vertical qui passe par cet astre et par l'œil, on ne tarde pas à constater des signes de polarisation, qui vont en augmentant jusqu'à 90° environ du soleil, puis diminuent, pour devenir nuls

vers 150°. Le point du plan vertical où la polarisation est nulle se nomme le *point neutre d'Arago*. Jusque-là le plan de polarisation est dans le plan vertical du soleil ; ce qui prouve que la lumière atmosphérique est réfléchie. Au-delà du point neutre, la lumière se montre de nouveau polarisée, mais dans un plan horizontal ; ce qui a fait dire que la polarisation était alors produite par réfraction, la réfraction, comme nous le verrons, polarisant perpendiculairement au plan de réfraction. Mais il n'en peut être ainsi, puisque les rayons viennent d'une région opposée au soleil.

MM. Arago, Biot et Forbes attribuent la lumière polarisée au-delà de 150°, à une double réflexion subie par les rayons solaires. En effet, la lumière atmosphérique provenant d'une seule réflexion émane d'une sorte de calotte illuminée qui envoie des rayons vers une molécule d'air, considérée à part, et cette molécule les réfléchit en les polarisant. C'est surtout des parties de l'atmosphère voisines de l'horizon, que viennent les rayons qui, après une seconde réflexion, passent par l'œil de l'observateur. On peut donc regarder ces rayons comme partant d'un anneau horizontal, de manière que le plan de polarisation à la seconde réflexion sera à peu près horizontal. Près de l'horizon et à l'opposé du soleil, les rayons polarisés horizontalement l'emportent sur ceux qui sont polarisés verticalement après une seule réflexion ; ces deux sortes de rayons sont égaux, au point neutre, puis les derniers l'emportent quand on se rapproche du soleil.

M. Babinet a reconnu un second point neutre à 17° environ du soleil, et M. Brewster, un troisième point au-dessous de cet astre, vers 8° 36′, mais très difficile à saisir. Ces deux points neutres nous semblent devoir être expliqués par les rayons qui, traversant directement l'atmosphère, sont polarisés par réfraction dans un plan horizontal, et contrebalancent ceux qui sont polarisés par réflexion. Entre les deux points neutres de M. Babinet et de M. Brewster, on devrait donc trouver la lumière polarisée par réfraction, si l'éclat de l'astre ne rendait les observations presque impossibles.

La présence de quelques nuages suffit pour déplacer les points neutres et modifier l'état de polarisation que nous venons de décrire. Il n'y a pas de traces de lumière polarisée quand le ciel est entièrement couvert. Ajoutons enfin que M. Delezenne a trouvé des signes de polarisation, dans l'atmosphère éclairée par la lumière de la lune.

Horloge polaire. — M. Wheatstone a imaginé un instrument qui donne l'heure d'après la position du plan de polarisation de l'atmosphère, quand le ciel est pur. Cet instrument se compose d'un tube porté par un pied, et qu'on dirige vers le pôle céleste. Ce tube est muni d'un polariscope très sensible, qui peut tourner sur lui-même, et au moyen duquel, on cherche la position du plan de polarisation de l'atmosphère. Ce plan passe par le soleil et coïncide par conséquent avec le plan horaire. Un limbe, sur la moitié supérieure duquel sont gravées les heures, et un vernier qui peut donner les minutes de temps,

font connaître alors l'heure approchée. Un cercle horizontal et un arc vertical adaptés à l'instrument, servent à orienter le tube.

Il nous faut exposer maintenant comment la réflexion agit pour polariser la lumière; mais l'explication s'appuyant sur les lois de la réflexion de la lumière polarisée, nous allons d'abord faire connaître ces lois.

II. Réflexion de la lumière polarisée.

2355. Lois expérimentales de la réflexion de la lumière polarisée. — Tout ce que nous allons dire sur la réflexion de la lumière polarisée est vrai, quelle que soit la cause qui l'a polarisée.

Le premier fait à constater est le changement d'intensité du rayon réfléchi quand on fait varier l'angle du plan de polarisation avec le plan d'incidence, angle que l'on appelle l'*azimut* du plan de polarisation. Le maximum d'éclat a lieu quand le rayon est polarisé dans le plan d'incidence, ou dans le *premier azimut*; et le minimum, quand il est polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, ou dans le *second azimut*. C'est à cette propriété que nous devons les *polariscopes de réflexion* (2335). Il est à remarquer que la plus grande *différence* d'éclat du rayon réfléchi a lieu, quand l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation de la substance réfléchissante; et, comme le rayon qui entre sous l'angle de polarisation à la première face d'une plaque, rencontre aussi la seconde sous l'angle de polarisation qui lui correspond (2349), on voit que, s'il échappe à la réflexion à la première face, il fera de même à la seconde, et traversera entièrement (en négligeant la partie absorbée); car ce qui n'est pas réfléchi est transmis intégralement (1898). Un miroir, qui est incapable de polariser complétement un faisceau, est aussi incapable d'éteindre complètement un faisceau polarisé de même intensité. Enfin, les substances qui polarisent à peine par réflexion, comme les métaux, ne donnent que des différences d'éclat très faibles, quand on les emploie comme polariscopes. La réflexion totale, qui ne polarise pas du tout, ne peut non plus servir à reconnaître la lumière polarisée. Il y a donc réciprocité complète entre les polarisateurs et les polariscopes par réflexion.

Quand on fait tourner le miroir autour du rayon polarisé incident, en conservant le même angle d'incidence, l'intensité du rayon réfléchi diminue, du premier azimut au second. Malus a admis que, dans le cas de l'angle d'incidence égal à l'angle de polarisation, cette intensité varie proportionnellement à $\cos^2\alpha$, α étant l'azimut du plan de polarisation; de manière que, si 1 est l'intensité du rayon réfléchi dans le premier azimut, cette intensité est $\frac{1}{2}$ dans l'azimut de $45°$, et zéro dans le second azimut. Cela suppose que la substance est capable de polariser complétement. Cette loi, à laquelle la théorie nous conduira (2360), a été vérifiée par Arago.

Quant aux variations du faisceau réfléchi, dans chaque azimut quand on

s'écarte de l'angle de polarisation, elles sont représentées par des formules assez compliquées, données par la théorie (2360), et confirmées par l'expérience.

2356. Changement du plan de polarisation dans la réflexion. — En même temps qu'un rayon polarisé se réfléchit, le plan de polarisation change de position en se rapprochant du plan de réflexion ; et la tangente du nouvel azimut est, pour chaque incidence, proportionnelle à la tangente du premier. Il résulte de là que l'on pourra, par un certain nombre de réflexions successives dans des plans d'incidence parallèles entre eux, amener le plan de polarisation assez près du plan de réflexion pour qu'on puisse le regarder comme se confondant avec lui. Voyons maintenant comment la théorie rend compte de ces divers résultats.

2357. Principes de Fresnel [1]. — Jamais on n'aurait soupçonné avant Fresnel, qu'il fût possible de représenter, au moyen de formules algébriques, la proportion de lumières réfléchie par un miroir, en fonction de l'angle d'incidence et de l'indice de la substance. Il est vrai que Fresnel a dû, pour obtenir ce résultat, partir de certains principes mécaniques, relatifs aux mouvements vibratoires, qui n'avaient pas été démontrés complétement, de son temps, et qu'il devina par un effort de génie. Mais, outre que ces principes sont très probables *à priori*, les formules auxquelles ils ont conduit ont été vérifiées si complétement par l'expérience, qu'on pouvait les regarder comme prouvés *à posteriori*. Du reste, ils ont été démontrés depuis par Cauchy. Voici en quoi ils consistent :

1° De part et d'autre de la surface de séparation de deux milieux, l'éther possède la même élasticité, mais sa densité est différente ; elle est la plus grande dans le milieu le plus réfringent.

2° Quand une onde arrive à la surface de séparation de deux milieux, la force vive qu'elle apporte est égale à la somme des forces vives de l'éther ébranlé dans l'onde réfléchie et dans l'onde réfractée. C'est-à-dire que le produit par le carré de la vitesse des vibrations, d'une masse d'éther, prise dans le faisceau incident et ayant une épaisseur égale à une longueur d'ondulation, est égal à la somme des produits correspondants relatifs aux ondes réfléchie et réfractée. Ce principe, qui nous a déjà servi dans l'étude du choc des corps élastiques, est général en mécanique, pour des points dont les vitesses ne changent qu'en vertu de leur liaison mutuelle.

3° Les couches de molécules d'éther, très voisines de la surface de séparation, dans les deux milieux, oscillent de la même manière ; les mouvements qui correspondent à l'onde incidente et à l'onde réfléchie, se communiquent à l'onde réfractée, de manière que la composante parallèle à la surface de séparation, de la vitesse de l'éther dans cette dernière onde, est égale à la somme des composantes des vitesses de l'éther dans les ondes incidente et

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2ᵉ série, t. XLVI, p. 225.

réfléchie. Cela tient à la solidarité des molécules contiguës, qui sont liées entre elles par les forces dont dépend l'élasticité de l'éther. Mais ce principe n'est pas aussi évident que le précédent, et il a fallu l'accord remarquable entre les résultats auxquels il a conduit et ceux de l'expérience, pour qu'on pût l'admettre, avant que Cauchy en eût donné la démonstration mathématique.

Remarque. — Il est encore une supposition qu'a faite Fresnel et sans laquelle les formules ne représenteraient plus les phénomènes. Il admet que, dans l'acte de la réflexion, les vibrations n'éprouvent pas de changement de phases; en d'autres termes, que « les périodes de vibration des ondes incidente et réfléchie coïncident, à la surface de séparation des deux milieux. » Or, il n'en est ainsi que pour quelques rares substances, comme l'alun et la ménilite, et à fort peu près pour le verre. Pour les autres corps, particulièrement pour ceux qui ont un grand indice de réfraction, le rayon réfléchi n'est pas polarisé dans un plan, mais éprouve la *polarisation elliptique*. Si donc les expériences de M. Seebeck et de M. Brewster, sur les substances les plus réfringentes, ont donné des résultats d'accord avec les formules, il faut l'attribuer aux erreurs que comportent leurs méthodes de mesure, qui ne permettaient pas de reconnaître des différences très petites. Nous allons donc considérer ici le cas où il n'y a pas de différence de phase, devant nous occuper de l'autre cas, beaucoup plus général, dans le chapitre que nous consacrerons à la polarisation elliptique.

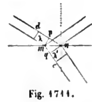


Fig. 1711.

2358. Réflexion de la lumière polarisée dans le plan d'incidence. — Dans ce cas, les mouvements vibratoires de l'éther, perpendiculaires au plan de polarisation (2341), le sont aussi au plan d'incidence. Soient 1, v et u les vitesses de vibration dans les rayons *incident*, *réfléchi* et *réfracté*, et concevons deux prismes, dm, nc (*fig.* 1711), l'un dans le faisceau incident, l'autre dans le faisceau réfracté, et ayant pour hauteurs les longueurs d'ondulation λ et λ' dans les deux milieux. Les masses d'éther contenues dans ces prismes sont $\overline{mp} \times \lambda \times d$, et $\overline{nq} \times \lambda' \times d'$, en représentant par d et d' les densités de l'éther. On a aussi $\overline{mp} = \overline{mn} \cos i$, et $\overline{nq} = \overline{mn} \cos r$, et $\lambda : \lambda' = v : u = \sin i : \sin r$, en désignant par i et r les angles d'incidence et de réfraction. Le rapport entre les deux masses d'éther est donc $d \sin i \cos i : d' \sin r \cos r$. Or, la formule de Newton donne $v^2 = e : d$, et $u^2 = e : d'$, e étant l'élasticité de l'éther, *supposée la même dans les deux milieux* (2357). On tire de là $d : d' = v^2 : u^2$, et le rapport devient

$$\frac{\sin i \cdot \cos i}{v^2} : \frac{\sin r \cdot \cos r}{u^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\cos i}{\sin i} : \frac{\cos r}{\sin r},$$

parce qu'on a $v : u = \sin i : \sin r$. Ecrivant maintenant que la force vive dans

le faisceau incident est égale à la somme des forces vives dans les faisceaux réfléchi et réfracté, il vient

$$[\alpha] \quad \frac{\cos i}{\sin i} \cdot 1^2 = \frac{\cos i}{\sin i} v^2 + \frac{\cos r}{\sin r} u^2; \text{ ou } (1 - v^2) \cos i \sin r = u^2 \sin i \cos r.$$

Une seconde relation entre u et v est donnée par le troisième principe (2357), et les vibrations se faisant dans la surface même, normalement au plan d'incidence, on a $u = v + 1$. En éliminant successivement u et v entre cette équation et la précédente, on obtient

$$v = -\frac{\sin (i-r)}{\sin (i+r)}, \qquad u = \frac{2 \cos i \sin r}{\sin (i+r)}.$$

Fresnel est arrivé aux mêmes résultats, en partant des formules du choc des corps élastiques. Quand un corps en choque un autre en repos, les vitesses après le choc sont ici $v = \frac{m-m'}{m+m'}$, et $u = \frac{2m}{m+m'}$ (I,473); et l'on remplace m et m' par $\cos i : \sin i$ et $\cos r : \sin r$.

On voit que si l'on a $i > r$, c'est-à-dire si le second milieu est plus réfringent que le premier, la vitesse est négative, c'est-à-dire qu'elle change brusquement de signe, ce qui revient à un retard de $\frac{1}{2}\lambda$ dans le rayon réfléchi. Nous retrouvons donc ici le principe d'Young, qui nous a servi dans la théorie des couleurs produites par les lames minces (2296).

Intensité du rayon réfléchi. — L'analyse mathématique prouve que l'intensité d'un rayon lumineux est proportionnelle au carré de la vitesse de vibration. Si donc on désigne par 1 l'intensité du rayon incident, et par a^2 celle du rayon réfléchi, on aura

$$[1] \qquad a^2 = \frac{\sin^2 (i-r)}{\sin^2 (i+r)}, \qquad \text{ou} \qquad a^2 = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \cos i}\right)^2,$$

en développant $\sin (i-r)$ et $\sin (i+r)$, en remplaçant $\sin r$ et $\cos r$ par leur valeur en fonction de i et de l'indice de réfraction n.

Discussion. — Quand l'angle d'incidence augmente, a^2 augmente aussi d'une manière continue, depuis $i = 0$, jusqu'à $i = 90°$. En effet, i étant toujours moindre que $90°$, $\frac{\sin^2 (i-r)}{\sin^2 (i+r)}$ est toujours plus grand que $\frac{n-1}{n+1}$; car $\sin (i-r)$ surpasse $\sin i - \sin r = (n-1) \sin r$, d'autant plus que r est plus grand; au contraire, $\sin (i+r)$ est toujours inférieur à $\sin i + r = (n+1) \sin r$, d'autant plus que r est aussi plus grand. La valeur de $\frac{\sin (i-r)}{\sin (i+r)}$ surpasse donc $\frac{\sin i - \sin r}{\sin i + \sin r} = \frac{(n-1) \sin r}{(n+1) \sin r}$, d'autant plus que r est plus grand. Comme cette dernière fraction est constante, la première augmente d'une manière continue avec r, et par conséquent, avec i, et son

minimum a lieu pour $i=0$, qui donne $a^2=\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$, et son *maximum*, pour $i=90°$, qui donne $a^2=1$, auquel cas le rayon incident est couché sur la surface réfléchissante.

2359. Réflexion dans un plan perpendiculaire au plan de polarisation. — Dans ce cas, les mouvements vibratoires s'accomplissent dans le plan d'incidence. La première équation [α], relative au principe de la conservation des forces vives, reste la même : $(1-v'^2)\cos i \sin r = u'^2 \sin i \cos r$. Mais la seconde doit être modifiée ; car les mouvements de l'éther n'ayant pas lieu parallèlement à la surface réfléchissante, il faut considérer, au lieu des vitesses, leurs composantes parallèles à cette surface ; or, ces composantes sont : $1.\cos i$, $v'\cos i$, et $u'\cos r$. La seconde équation est donc $u'\cos r=(1+v')\cos i$. En éliminant successivement u' et v' entre cette équation et la première, on trouve

$$v'=\frac{\sin r\cos r-\sin i\cos i}{\sin r\cos r+\sin i\cos i}=-\frac{\operatorname{tang}(i-r)}{\operatorname{tang}(i+r)},$$

$$\text{et}\quad u'=\frac{2\cos i\sin r}{\sin i\cos i+\sin r\cos r}.$$

Si i est plus grand que r, c'est-à-dire si le second milieu est plus réfringent que le premier, la valeur de v' sera négative quand $i+r$ sera moindre que 90, c'est-à-dire quand i sera moindre que l'angle de polarisation ; elle sera positive dans le cas contraire.

L'intensité b^2 du rayon réfléchi sera, en prenant toujours pour unité celle du rayon incident :

$$[2]\qquad b^2=\frac{\operatorname{tang}^2(i-r)}{\operatorname{tang}^2(i+r)}=\left(\frac{\sqrt{n^2-\sin^2 i}-n^2\cos i}{\sqrt{n^2-\sin^2 i}+n^2\cos i}\right)^2.$$

Discussion. — Pour $i=0$, on a $b^2=(n-1)^2:(n+1)^2$. C'est la même valeur que dans le cas précédent; ce qui se conçoit bien, car le rayon incident étant normal, les mouvements vibratoires s'exécutent dans la surface réfléchissante, et l'intensité du rayon réfléchi doit être indépendante de leur direction. Pour $i=90°$, on a encore $b^2=1$. Mais la valeur de b^2 ne croît pas d'une manière continue de $i=0$ à $i=90°$; car, en considérant la première forme de la valeur de b^2, on voit qu'elle devient nulle quand on fait $i+r=90°$. Un rayon polarisé perpendiculairement au plan d'incidence ne donne donc plus de rayon réfléchi, quand le rayon incident est perpendiculaire au rayon réfracté, c'est-à-dire *quand l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation* ; on retrouve donc la loi de Brewster (2346).

2360. Réflexion dans un plan oblique au plan de polarisation. — Les mouvements vibratoires sont, dans ce cas, obliques au plan d'incidence. Décomposons la vitesse de vibration dans le rayon incident, en deux compo-

santes situées dans un plan normal, à ce rayon, et l'une perpendiculaire au plan d'incidence et l'autre dans ce plan. En représentant toujours par 1 la vitesse de vibration du rayon incident; et par α l'angle du plan de polarisation avec le plan d'incidence, $\cos\alpha$ et $\cos(90°-\alpha)=\sin\alpha$ seront les vitesses composantes. La lumière incidente polarisée dans l'azimut α, peut donc être regardée comme la somme de deux faisceaux, l'un d'intensité $\cos^2\alpha$, polarisé dans le plan d'incidence, l'autre d'intensité $\sin^2\alpha$, polarisé normalement à ce plan, et donnant (2358, 2359) des faisceaux réfléchis d'intensité

$$[3] \qquad r=\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2\alpha, \quad \text{et} \quad r'=\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2\alpha.$$

La somme de ces deux faisceaux réfléchis donnera, pour l'intensité du faisceau total réfléchi

$$[4] \qquad R=r+r'=\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2\alpha+\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2\alpha\,;$$

car deux faisceaux polarisés à angle droit ne peuvent se détruire, ni même s'affaiblir mutuellement.

Cette formule comprend les deux cas précédents ; car, en y faisant successivement $\alpha=0$ et $\alpha=90°$, le second, puis le premier terme, disparaissent.

Si α est égal à 45°, on a $\cos^2\alpha=\sin^2\alpha=\frac{1}{2}$, et la formule devient

$$[5] \qquad R=\frac{1}{2}\left(\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}+\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right),$$

résultat qui convient au cas de deux rayons d'intensité égale à $\frac{1}{2}$, polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire; et aussi à deux rayons d'intensité $\frac{1}{2}$ polarisés dans deux plans perpendiculaires l'un à l'autre et inclinés d'une manière quelconque par rapport au plan d'incidence; car les angles qu'ils feraient avec ce plan d'incidence seraient α et $90°-\alpha$, et pour avoir la somme de leurs intensités, il faudrait multiplier le premier terme de la formule [5] par $\cos^2\alpha+\cos^2(90°-\alpha)$, et le second terme par $\sin^2\alpha+\sin^2(90°-\alpha)$, facteurs égaux à l'unité.

Si nous supposons i égal à l'angle de polarisation, il faut faire $i+r=90°$; et la formule [4] devient $R=\sin^2(i-r)\cos^2\alpha$. L'intensité est donc proportionnelle à $\cos^2\alpha$, comme l'avait admis Malus (2355).

Remarque. — Pour établir les calculs qui précèdent, Fresnel a supposé que l'élasticité de l'éther est la même dans tous les milieux homogènes (2358) et que sa densité est variable. MM. Neumann et Mac Cullagh, ont supposé, au contraire, que l'élasticité change d'un milieu à un autre, et que la densité de l'éther est invariable. Cette nouvelle hypothèse conduit aussi à des formules que vérifie l'expérience, mais à la condition d'admettre que les vibrations de l'éther se font dans le plan de polarisation, supposition que Fresnel a rejetée par les raisons que nous avons indiquées (2341). Nous devons dire cependant

que certains doutes ont été élevés sur la direction des vibrations. M. Jamin a fait voir que l'opinion adoptée par Fresnel conduit à une conséquence impossible[1]. En outre, certains phénomènes de polarisation par *diffraction*, trop peu connus encore pour que nous fassions autre chose que les mentionner, ont fait naître de nouveaux doutes[2]. C'est donc là un point qui demande à être éclairci.

2361. Changement du plan de polarisation par la réflexion. — Les deux rayons polarisés à angle droit, dans lesquels se décomposent un rayon polarisé dans un azimut quelconque, se trouvant dans la même phase au point d'incidence, et leur rapport d'intensité restant le même dans le rayon réfléchi à toute distance de ce point, la résultante des vitesses sera partout dirigée dans le même plan, de sorte que le rayon réfléchi sera encore polarisé.

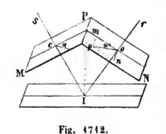


Fig. 1712.

Mais le plan de polarisation, dont la position dépend du rapport entre les deux vitesses, ne sera pas le même que dans le rayon incident. En effet, soient PM et PN (*fig.* 1712), des plans perpendiculaires aux rayons, incident *sI* et réfléchi I*r*; *sIr* le plan d'incidence, *αcl* le plan de polarisation du rayon incident, et *pol* celui du rayon réfléchi, dont on cherche l'azimut $\alpha' = mop$. Si nous décomposons la vitesse de vibration *op* en deux autres, l'une *om* dans le plan d'incidence, et l'autre *on* perpendiculaire à ce plan, nous aurons $\tang \alpha' = on : om$. Or, les vitesses *on* et *om* ont été calculées dans les numéros 2358 et 2359. Il faudra seulement multiplier les expressions trouvées pour v et v', par $\sin \alpha$ et par $\cos \alpha$, parce que les intensités des rayons considérés sont ici $\sin \alpha$ et $\cos \alpha$, au lieu de 1. On trouve ainsi

$$\overline{om} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \cos \alpha\,; \qquad \overline{on} = \overline{pm} = -\frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)} \sin \alpha\,;$$

$$\text{d'où} \qquad \tang \alpha' = \frac{pn}{om} = \tang \alpha \, \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}\,, \qquad [6]$$

On voit que α' étant, en général, différent de α, le plan de polarisation tourne d'une certaine quantité, par la réflexion.

Quand le rayon incident est dirigé suivant la normale, α' est égal à α, puisqu'on a $i = 0$ et $r = 0$. Ce résultat était facile à prévoir; car alors les vibrations ont lieu dans la surface réfléchissante, et il n'y a pas de raison pour qu'elles changent de direction. — Si l'on a $i + r = 90°$, c'est-à-dire si l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation, il vient $\alpha' = 0$, quel que

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3ᵉ série, t. LIX, p. 413.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3ᵉ série, t. LV, p. 491, 501, 504; et t. LXI, 227.

soit α ; ce qui montre que, sous l'angle de polarisation, le rayon réfléchi est toujours polarisé dans le plan de réflexion. Par conséquent, si le rayon incident était polarisé dans le plan d'incidence, le plan de polarisation ne changerait pas. Il en serait de même s'il était polarisé perpendiculairement au plan d'incidence ; car, pour $\alpha = 90°$, on a tang $\alpha = \infty$, et par conséquent tang $\alpha' = \infty$, et $\alpha' = 90°$. Tous ces résultats sont conformes à l'expérience.

Le rapport $\cos(i+r) : \cos(i-r)$ étant moindre que l'unité, la formule [6] montre que α' est toujours moindre que α, sauf dans les cas particuliers où il lui est égal. La réflexion a donc pour effet de rapprocher le plan de polarisation, du plan d'incidence. D'où il résulte que, si le rayon se réfléchit un certain nombre de fois sur plusieurs miroirs, le plan d'incidence restant toujours le même, son plan de polarisation finira par se confondre sensiblement avec le plan d'incidence. Le nombre des réflexions nécessaires pour cela sera d'autant plus grand que les angles d'incidence aux diverses réflexions différeront plus de l'angle de polarisation, et que l'angle α sera plus grand. Ce nombre pourra se calculer au moyen de la formule [6], en y remplaçant successivement α par les différents angles α', α''..., α_n, qu'on trouvera successivement, jusqu'à ce qu'on obtienne une tangente assez petite pour que α soit négligeable ; car il est facile de voir que jamais α ne pourra être nul.

La formule [6] a été vérifiée par Arago sur le verre et sur l'eau. L'appareil de Biot (2343) ou celui de Seebeck (2346) peuvent servir à cette vérification. Il suffit de faire tomber sur la surface réfléchissante, un faisceau polarisé dans un plan connu, et de chercher, avec le polariscope p, la position du plan de polarisation dans le faisceau réfléchi. M. Brewster a surtout fait beaucoup d'expériences à ce sujet ; et quoique l'accord entre la théorie et l'observation soit satisfaisant, il faut bien admettre que les procédés d'expérience n'avaient pas alors atteint un degré de précision suffisant, car cet accord existe au même degré pour le diamant, et nous verrons que les formules ne peuvent s'appliquer à cette substance, à cause du changement de phase dont nous avons déjà dit un mot (2357).

La formule [6] peut aussi servir à calculer l'indice de réfraction ; car elle donne la valeur de r quand on connaît α, α' et i. C'est là un des moyens qu'a employés Fresnel pour contrôler sa formule. Il a trouvé un accord satisfaisant entre les indices ainsi calculés et ceux que donnent les mesures directes.

III. Théorie de la polarisation par réflexion.

2362. Un faisceau naturel revient à deux faisceaux d'égale intensité polarisés à angle droit. — La lumière naturelle est produite par une infinité de mouvements vibratoires ayant lieu successivement dans tous les sens à la surface de l'onde. Chacun de ces mouvements peut être décomposé en deux autres, suivant deux directions constantes perpendiculaires entre elles ;

de sorte que le rayon peut être remplacé par deux autres, polarisés dans des plans perpendiculaires entre eux. La différence entre les composantes qui se succèdent en un point du rayon, change à chaque instant, ces composantes provenant de résultantes qui changent sans cesse de direction ; mais, à cause de la rapidité de ces changements, on doit trouver, dans une certaine étendue du rayon correspondant à un temps bien moindre que la durée de la sensation, une somme de composantes dans un des plans, égale à la somme correspondante, dans l'autre ; de sorte que les deux rayons composants ont la même intensité. Un rayon naturel d'intensité 1 peut donc être regardé comme formé de deux rayons polarisés à angle droit et d'intensité égale à $\frac{1}{2}$. Un semblable rayon se réfléchit également dans tous les azimuts ; car l'intensité du rayon réfléchi est donnée par la formule [5] (2360). — Cette décomposition d'un rayon naturel en deux autres polarisés à angle droit est réalisée dans la double réfraction ; car nous verrons que les deux rayons dans lesquels se partage le rayon incident, sont polarisés dans des plans rectangulaires.

Pour montrer comment un rayon naturel est constitué par des vibrations qui se succèdent dans toutes les directions, M. Dove fait passer ce rayon à travers un prisme de Nicol, qui lui imprime la polarisation dans sa section principale. Faisant ensuite tourner rapidement le prisme sur lui-même, il trouve que le rayon émergent ne présente plus de traces de polarisation, même avec les polariscopes les plus sensibles. Si la lumière est instantanée, comme celle d'une étincelle électrique, on reconnaît qu'elle est polarisée ; le prisme, et par conséquent la direction des vibrations, qui tourne avec lui, n'ayant pas le temps de se déplacer pendant un durée aussi courte.

2363. Intensité de la lumière naturelle réfléchie. — D'après ce qui précède, un faisceau de lumière naturelle d'intensité 1 peut être remplacé par deux faisceaux d'intensité $\frac{1}{2}$ polarisés dans des plans perpendiculaires, dont un dans le plan d'incidence. Or, ces deux rayons fournissent, à la réflexion, des intensités données par les formules [1] et [2]

$$\frac{1}{2}\,a^2 = \frac{1}{2}\,\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}, \qquad \text{et} \qquad \frac{1}{2}\,b^2 = \frac{1}{2}\,\frac{\operatorname{tang}^2(i-r)}{\operatorname{tang}^2(i+r)}. \qquad [7]$$

L'intensité du rayon réfléchi sera donc leur somme $N = \frac{1}{2}(a^2 + b^2)$. Cette somme va en augmentant quand i passe de 0° à 90°. Si l'on exprime a^2 et b^2 en fonction de n et de i, comme il a été fait plus haut (2358, 2359), on voit facilement que, pour $i = 0$ et $i = 90°$, l'intensité N devient $\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$, et 1. Sous l'angle de polarisation, on a $i + r = 90°$, et il vient $N = \frac{1}{2}\sin^2(i-r) = \frac{1}{2}\left(\frac{n^2-1}{n^2+1}\right)^2$, car on a $\operatorname{tang} i = n$. La valeur de N est moindre que 1, et plus grande que $\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$; car elle revient à $\frac{1}{2}\,\frac{n-1}{n+1}\cdot\frac{n+1}{n+1}$. La lumière réfléchie augmente donc avec l'angle d'inci-

dence. Pour le verre, dont l'indice est 1,5, les valeurs correspondantes à $i=0$, $i+r=90°$, et $i=90°$, sont 0,04 ; 0,15 et 1. Dans le cas de l'incidence normale, et en ne considérant que les rayons réfléchis à la première surface, on trouve

	pour l'eau,	*le sel gemme,*	*le cristal de roche,*	*le diamant,*
les nombres	0,0195	0,045	0,048	0,175

On voit pourquoi le diamant jette un si vif éclat. Les nombres qui correspondent au sel gemme, au verre et au cristal de roche, diffèrent très peu de ceux que Melloni avait trouvés pour les quantités de chaleur réfléchies par les mêmes substances. Cela se conçoit facilement ; car il résulte de la position des rayons calorifiques dans le spectre, que l'indice de réfraction de ces rayons diffère peu de celui des rayons lumineux.

Si la lumière incidente était en partie polarisée, on la considérerait comme composée de deux faisceaux : l'un polarisé, d'intensité p ; l'autre naturel, d'intensité $1-p$. L'intensité du rayon réfléchi par le premier serait donnée par la formule [4] $R=p\,(r+r')$, (2360), et celle du faisceau réfléchi par le second, par la formule $N=(1-p)\,\frac{1}{2}\,(a^2+b^2)$.

2364. Explication de la polarisation par réflexion. — Les formules [7] (2363) montrent que a est plus grand que b ; car en multipliant et en divisant chaque terme de a par le *cosinus* de l'angle, il vient $\frac{\tang^2(i-r)\cos^2(i-r)}{\tang^2(i+r)\cos^2(i+r)}$, quantité plus grande que b, puisque $\cos(i+r)$ est moindre que $\cos(i-r)$. Ce résultat nous montre que le rayon partiel polarisé dans le plan d'incidence, ou en d'autres termes, que les mouvements perpendiculaires à ce plan, se réfléchissent en plus grande proportion que ceux qui s'accomplissent dans ce plan. De là la plus grande abondance des premiers mouvements dans le faisceau réfléchi, et, par conséquent, *la polarisation partielle de ce dernier dans le plan de réflexion.*

Proportion de lumière polarisée. — L'intensité de la lumière non polarisée est représentée par $\frac{1}{2}b^2$, et la quantité polarisée dans le plan d'incidence, par l'excès du rayon $\frac{1}{2}a^2$ polarisé dans ce plan, sur le rayon $\frac{1}{2}b^2$, polarisé en sens contraire ; c'est-à-dire par $\frac{1}{2}(a^2-b^2)$. La *proportion* de lumière polarisée dans le plan d'incidence est donc

$$P=\frac{a^2-b^2}{a^2+b^2}=\frac{\cos^2(i-r)-\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)+\cos^2(i+r)}, \qquad [8]$$

en remplaçant les *sinus* par leur valeur en fonction de la tangente et du cosinus, comme nous venons de le faire pour prouver qu'on a $a>b$.

Discussion. — La proportion de lumière polarisée est nulle quand le rayon incident est normal à la surface réfléchissante; car pour $i=0$ et $r=0$, on a $P=0$; ce que Malus avait découvert par l'expérience. On a encore

P = 0 quand $i = 90°$, c'est-à-dire quand le rayon incident est couché sur la surface. Si nous supposons $i + r = 90°$, nous aurons P = 1 ; toute la lumière réfléchie sera donc polarisée, et nous retrouvons la *loi de Brewster* (2346).

Si l'on veut l'incidence pour laquelle la quantité absolue de lumière polarisée est maximum, il faut calculer la valeur de i qui rend $\frac{1}{2}(a^2 - b^2)$ maximum. Le calcul conduit à la relation $\cos(i + r) = \cos^3(i - r)$. Pour le verre, on a $n = 1{,}5$, et l'on trouve $i = 79°$, et 0,193 de lumière polarisée. L'intensité totale de la lumière réfléchie est 0,345 ; de sorte que la proportion de lumière polarisée est 0,44. Sous l'angle de polarisation, toute la lumière est polarisée, mais son intensité n'est que 0,074 de la lumière incidente.

2365. Explication synthétique de la polarisation par réflexion. — Le déplacement du plan de polarisation par la réflexion (2361) peut servir à rendre compte de la polarisation par réflexion. L'expérience, comme la théorie, montre que le plan de polarisation se rapproche du plan de réflexion. La réflexion a donc pour effet de rapprocher les directions des mouvements vibratoires, de la perpendiculaire à ce plan. Or, cette influence doit se faire sentir sur chaque vibration individuellement ; elle agira donc ainsi sur la direction de chacune des vibrations différemment orientées qui se succèdent dans un rayon naturel, et cette direction se trouvera, pour toutes, rapprochée de la perpendiculaire au plan de réflexion. Le *rayon composant* polarisé dans ce plan l'emportera donc en intensité sur l'autre. Si cependant le rayon tombe sous l'angle de polarisation, chacune des vibrations sera amenée à être exactement perpendiculaire au plan de réflexion, puisque nous avons vu que le rayon réfléchi est alors polarisé dans le plan de réflexion (2361), et le rayon naturel se trouvera entièrement polarisé.

Remarque. — La théorie semble indiquer que le rayon réfléchi sous l'angle de polarisation est toujours entièrement polarisé ; ce qui est contraire à l'expérience. Mais n'oublions pas que nous avons supposé, avec Fresnel, que la réflexion n'apportait pas de changement de phases dans les mouvements vibratoires ; ce qui n'a lieu, comme nous en avons déjà averti (2347), que pour les rares substances qui polarisent complétement. Le verre et l'eau sont à peu près dans ce cas ; aussi les expériences par lesquelles Arago a cherché à vérifier la formule [8], lui ont-elles donné des résultats satisfaisants. Il procédait en cherchant les incidences pour lesquelles le rayon réfléchi renfermait toujours la même *proportion* de lumière polarisée. Il se servait pour cela de polariscopes pouvant donner cette proportion, et que nous décrirons plus loin, sous le nom de *polarimètres*. M. Ed. Desains a aussi vérifié cette formule pour le verre, en se servant des méthodes polarimétriques d'Arago[1].

2366. Polarisation par des réflexions successives. — L'augmentation de la proportion de lumière polarisée, par des réflexions successives s'explique facilement, quand on considère le faisceau partiellement polarisé comme

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXI, p. 286.

composé de rayons polarisés et de rayons à l'état naturel. En effet, les miroirs étant tous perpendiculaires au premier plan d'incidence, et par conséquent au plan de polarisation, la portion polarisée du faisceau est réfléchie en grande proportion, pendant que la portion naturelle se partage en deux parties, l'une transmise, l'autre réfléchie, qui se polarise en partie et ajoute à la proportion de lumière polarisée dans le faisceau réfléchi. On voit qu'il faudra un nombre infini de réflexions pour obtenir un faisceau totalement polarisé, s'il s'agit d'une substance qui ne polarise complètement sous aucun angle ; puisqu'une partie seulement de la lumière naturelle réfléchie se polarise. Mais après un certain nombre de réflexions, la proportion de lumière naturelle sera très faible et négligeable.

2367. Système de M. Brewster sur la lumière partiellement polarisée. — Au lieu de regarder la lumière incomplètement polarisée comme un mélange de lumière naturelle et de lumière totalement palarisée, M. Brewster a cru pouvoir conclure de ses expériences sur les réflexions multiples, qu'aucun rayon élémentaire du faisceau n'est entièrement polarisé. Il admet que la réflexion imprime aux rayons un changement physique, qui les rend plus aptes à être polarisés par une nouvelle réflexion. Un rayon partiellement polarisé est celui dans lequel les plans de polarisation des faisceaux partiels polarisés à angle droit, dans lesquels on décompose la lumière naturelle, se sont rapprochés du plan d'incidence. La polarisation, dans ce systéme, admettrait donc des degrés. Cette maniére de voir et celle qu'ont adoptée les physiciens français, ne sont en réalité que deux modes différents de répré-senter un même fait, et, au fond, elles ne sont pas incompatibles l'une avec l'autre. Toutes les deux peuvent servir à rendre compte de la polarisation partielle; nous adopterons cependant de préférence le langage qui se rapporte à la premiére, comme se prêtant plus facilement à une interprétation simple des phénoménes.

§ 3. — POLARISATION PAR RÉFRACTION SIMPLE, ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

I. Lois de la polarisation par réfraction.

2368. Polarisation par réfraction. — La polarisation par réfraction simple a été découverte en 1811, par Malus, pendant que Biot et M. Brewster l'observaient aussi de leur côté. Pour constater ce phénoméne, on dispose, à la place du miroir *m* de l'appareil de Biot (2343), un prisme de verre, et on le tourne de manière que le rayon réfracté à son entrée, en sorte perpendiculairement à la face d'émergence, comme on le voit en P (*fig.* 1706). Si l'on fait tourner le polariscope placé en *p*, on observe des maximum et des mini-

mum d'intensité, mais peu prononcés, ce qui indique que la lumière n'est polarisée qu'en assez faible proportion.

Le plan de polarisation est *perpendiculaire* au plan de réfraction; si donc on reçoit le rayon polarisé, sur un miroir de verre, le maximum d'éclat a lieu quand le plan d'incidence sur ce miroir est perpendiculaire au plan d'incidence sur le prisme. Si le rayon sort obliquement à la seconde face du prisme, ou traverse obliquement une lame à faces parallèles, une nouvelle portion de lumière est polarisée à la sortie, et dans le même plan qu'à l'entrée. On voit que lorsqu'un rayon tombe sur la surface d'un milieu diaphane, le rayon réfléchi et le rayon transmis sont polarisés dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre. On dit qu'ils sont *polarisés à angle droit*, ou *en sens inverse*.

2369. Egalité des quantités de lumière polarisées par réflexion et par réfraction. — Arago a prouvé par l'expérience suivante, que les *quantités absolues* de lumière polarisée dans les faisceaux réfractés et réfléchis sont égales. On dispose une lame de verre à faces bien parallèles V (*fig.* 1713) perpendiculairement à une feuille de papier *ab* éclairée uniformément, et l'on regarde obliquement, à travers l'ouverture *o* d'un écran, la lumière transmise et réfléchie venant des parties *a* et *b* de la feuille. L'œil étant armé d'un prisme bi-réfringent *p*, on voit deux images de l'ouverture *o*. Soit *p* la quantité de lumière polarisée, et N la quantité de lumière naturelle que contient le faisceau réfléchi. Si l'on dirige la section principale du cristal dans le plan d'incidence, la partie naturelle N se partagera entre les deux images, tandis que la partie polarisée sera toute entière dans l'image ordinaire (2337). Les intensités de ces images seront donc $P + \frac{1}{2} N$, et $\frac{1}{2} N$, et on les observerait séparément si l'on interceptait les rayons transmis, au moyen d'un écran *e'*. Ces rayons transmis sont eux-mêmes composés d'une partie polarisée P', et d'une partie naturelle N'. Le plan de polarisation étant perpendiculaire au plan d'incidence, le faisceau ordinaire aura pour intensité $\frac{1}{2} N'$, et le faisceau extraordinaire $P' + \frac{1}{2} N'$, et on les observerait à part en plaçant un écran en *e*. Si maintenant on laisse passer à la fois les rayons réfléchis et transmis, les images se superposeront deux à deux, l'intensité de l'image ordinaire sera $P + \frac{1}{2} N + \frac{1}{2} N'$, et celle de l'image extraordinaire, $P' + \frac{1}{2} N' + \frac{1}{2} N$. Or, l'expérience montre que ces intensités sont égales. Il faut donc que l'on ait $P = P'$. Cette expérience se fait facilement avec l'appareil photométrique d'Arago, que nous décrirons plus loin (*fig.* 1716).

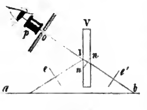


Fig. 1713.

Dans cette expérience, il y a deux réfractions, l'une à l'entrée, l'autre à la sortie du rayon transmis, et à chacune d'elles il se fait une polarisation partielle. Mais il y a aussi deux réflexions, aux deux faces de la lame. On peut,

du reste, comparer les rayons n'ayant subi qu'une seule réfraction et qu'une seule réflexion, en taillant la lame en biseau *nn* (*fig.* 1713), de manière que le rayon *bI* entrant normalement, n'éprouve de polarisation qu'à la sortie de la lame ; et recouvrant d'un écran noir une partie de la surface *ab*, de manière à intercepter les rayons qui, réfléchis à la seconde surface, se joindraient au rayon I*o*.

2370. Conséquences. — 1° Cette loi nous donne l'explication de ce fait d'expérience, qu'il n'y a pas de polarisation dans la *réflexion totale*, et dans la réflexion rasante ; en effet, le rayon réfracté ne contenant pas, dans ces deux cas, de lumière polarisée, puisqu'il n'existe pas, le rayon réfléchi n'en doit pas non plus contenir. — 2° Nous avons vu qu'il n'y a pas de polarisation dans la réflexion sous l'incidence normale ; il ne doit pas y avoir, dans le même cas, de lumière polarisée dans le rayon réfracté. — 3° Le maximum absolu de lumière polarisée par réfraction aura lieu sous la même incidence que le maximum de lumière polarisée par réflexion ; c'est-à-dire, pour le verre, sous l'incidence de 79°. Mais il n'y a pas *maximum* dans la *proportion* de lumière polarisée dans le rayon réfracté, sous l'angle de polarisation, comme pour le rayon réfléchi. — 4° La *proportion* de lumière polarisée dans le rayon réfracté, va constamment en augmentant, depuis $i = 0$ jusqu'à $i = 90°$. En effet, la quantité absolue de lumière polarisée augmente, comme dans le rayon réfléchi ; tandis que la lumière totale transmise va en diminuant, car elle est complémentaire de la quantité réfléchie. On voit donc qu'il n'y a pas d'angle de polarisation pour la lumière réfractée, que jamais cette lumière ne peut être entièrement polarisée, mais qu'elle contient d'autant moins de lumière naturelle que l'angle d'incidence est plus grand.

2371. Piles de glaces. — Quand on veut obtenir un faisceau entièrement polarisé par réfraction, il faut lui faire traverser successivement plusieurs lames parallèles. Un semblable système se nomme *pile de glaces* ou *pile de plaques*. Les lames de verre, minces, bien polies, et paralléles, peuvent être appliquées les unes sur les autres, mais sans adhérer, de manière qu'il y ait toujours une couche d'air interposée.

Les propriétés des piles de glaces ont été découvertes par Malus ; pour nous en rendre compte, considérons une pile de glaces recevant sous l'angle de polarisation un faisceau neutre, d'intensité 1. La lumière qui a traversé la première lame, en sort partiellement polarisée perpendiculairement au plan d'incidence. Soit p la partie polarisée, et n la partie qui reste à l'état neutre. La portion qui a été réfléchie sera $1-(p+n)$. La partie polarisée p, ne pouvant être réfléchie, sous l'angle de polarisation, par la première surface de la seconde lame (2359), pénétrera entièrement et traversera cette lame, ainsi que les suivantes, sans éprouver de pertes, l'absorption étant négligée. La partie n se partagera, à l'entrée de la seconde lame, comme la lumière incidente l'a fait à l'entrée de la première. Une portion $n(p+n) = np + n^2$ sera transmise, et $n - n(p+n)$ sera réfléchie. De la partie transmise, la portion polari-

sée np passera, sans éprouver de perte, à travers toutes les lames, et la partie non polarisée n^2 se partagera à l'entrée de la troisième lame, en lumière réfléchie $n^2(p+n)$, et en lumière transmise $n^2 - n^2(p+n)$...., et ainsi de suite. Si donc on suppose qu'il y ait m lames, le faisceau émergent contiendra $p + np + n^2p + \ldots + n^{m-1}p = p\,\frac{1-n^m}{1-n}$ de lumière polarisée. et une quantité n^m de lumière naturelle. Si m est suffisamment grand pour que n^m soit très petit, le faisceau émergent paraîtra entièrement polarisé perpendiculairement au plan d'incidence.

2372. Du nombre des plaques. — Le nombre des plaques nécessaires pour arriver à ce résultat dépend de leur nature, et surtout de l'angle d'incidence. Plus cet angle est grand, moins il faut de plaques; c'est que, si lorsqu'on dépasse l'angle de polarisation une partie de la lumière déjà polarisée se réfléchit, d'un autre côté, une plus grande proportion de celle qui reste naturelle est polarisée (2370); de sorte qu'il faut moins de plaques pour arriver à une suppression presque complète de la lumière naturelle. Par exemple, M. Brewster a trouvé que la lumière d'une bougie placée à une distance de 4 mètres environ, est entièrement polarisée, sous les incidences suivantes, par un nombre de lames de crown indiqué à la seconde ligne:

79° 11'	74°	69° 4'	63° 21'	60° 8'	57° 10'	53° 28'	50° 5'	45° 35'	41° 41'
8	12	16	21	24	27	31	35	41	47

Quand on dépasse l'angle pour lequel un nombre donné de plaques polarise complétement, la polarisation continue à être complète, mais l'intensité du faisceau polarisé diminue, parce que la proportion de lumière réfléchie augmente. Le maximum de lumière polarisée transmise ayant lieu sous l'angle de polarisation, parce qu'une portion n'est pas réfléchie, il convient d'employer cette incidence, en réunissant un nombre convenable de plaques. On peut, du reste, dépasser ce nombre sans inconvénient, la lumière totalement polarisée par réfraction ne pouvant se réfléchir sur les lames surnuméraires, comme on peut, du reste, s'en assurer, en écartant ces lames de manière à permettre d'observer les rayons réfléchis, s'il en existait.

Transparence d'une pile. — Une conséquence curieuse de ce qui précède, c'est qu'une pile de glaces est d'autant plus transparente, qu'elle est traversée plus obliquement, à partir de l'angle de polarisation. Cela tient à ce que la lumière polarisée dans chaque lame va en augmentant avec l'angle d'incidence, ce qui amoindrit les pertes par réflexion, dans une proportion plus grande qu'elles n'augmentent par l'influence de l'obliquité dans les premières lames, qui seules reçoivent beaucoup de lumière naturelle.

Les piles de glaces offrent l'avantage de fournir de la lumière polarisée très intense. Mais pour cela il faut qu'elles soient formées de lames bien pures, et très minces pour éviter les pertes par absorption. On fait des piles avec des

lames de mica, ou même avec une seule plaque un peu épaisse dont on a légérement séparé les feuillets par la chaleur. On en a fait avec des liquides visqueux, comme l'eau de savon, dans lesquels on trempait des lames de carton présentant une ouverture qui retenait une pellicule liquide. Deux feuilles d'or forment une pile qui polarise complétement la faible proportion de lumière solaire qu'elle laisse passer.

2373. Piles de glaces comme polariscopes. — Il est facile de concevoir le rôle des piles de glaces comme polariscopes. En effet, si l'on fait tomber obliquement sur la pile, le rayon à explorer, elle l'interceptera, d'aprés ce que nous venons de voir, quand son plan de polarisation se confondra avec le plan d'incidence, et le laissera passer quand ces deux plans seront perpendiculaires. Nous verrons (2397) que les piles de glaces peuvent aussi être employées comme *polarimètres*, c'est-à-dire pour évaluer la *proportion* de lumière polarisée contenue dans un faisceau.

2374. Application de la polarisation par réflexion. — La direction différente du plan de polarisation, dans les rayons réfléchis et réfractés, a fourni à Arago un moyen ingénieux pour distinguer les écueils en mer, malgré l'éclat de la lumière réfléchie qui les masque. Il suffit de regarder à travers une tourmaline ou un prisme de Nicol, dont la section principale soit verticale. Les rayons réfléchis sont éteints, et les rayons venant de l'écueil et réfractés par l'eau sont seuls transmis à l'œil.

Arago a constaté que la lumière des halos est polarisée perpendiculairement au plan passant par l'œil et normal à l'arc. Cette lumière est donc réfractée, ce qui confirme l'explication de Mariotte (2125).

Polarisation par émission. — Quand on observe au polariscope la lumière qui émane obliquement des solides ou des liquides incandescents, on reconnaît que cette lumière est en partie polarisée perpendiculairement au plan d'émission. Ce résultat, découvert par Arago, prouve qu'une portion notable des rayons a subi la réfraction, et par conséquent émane d'une certaine profondeur au-dessous de la surface.

D'après la loi de l'égalité entre les quantités de lumière polarisées dans la lumière réfractée et réfléchie (2369), les rayons réfléchis intérieurement à la surface d'un corps incandescent doivent contenir autant de lumière polarisée que les rayons émis. C'est, en effet, ce qui paraît avoir lieu; car le noir de fumée, qui ne réfléchit pas sensiblement de lumière intérieure, puisqu'il n'en peut réfléchir extérieurement, émet des rayons dépourvus de polarisation.

Cela nous explique anssi ce fait d'expérience, que la lumière des flammes et des gaz incandescents, ne présente pas de traces de polarisation; c'est que la réflexion intérieure n'existe pas pour ces sortes de fluides.

La lumière des bords du soleil ne présentant aucune trace de polarisation, Arago en a conclu que cette lumière ne peut être rayonnée par un corps solide ou liquide, et qu'elle émane d'un gaz incandescent; ce qui confirme l'hypothése d'une *photosphère* enveloppant le globe solaire (II, 1092).

On ne peut appliquer la même méthode d'investigation aux étoiles, parce que leur diamètre apparent étant insensible, les rayons qui émanent de leurs différents points se confondent, et s'ils étaient polarisés, les polarisations de ceux qui partent de points situés à 90° de distance angulaire les uns des autres, s'entre-détruiraient. Mais on peut l'appliquer aux étoiles variables; car, que les changements d'éclat soient dûs à la forme aplatie de ces astres, ou à des corps extérieurs qui en cachent périodiquement une partie, ou enfin à des parties obscures de leur surface, la polarisation des rayons qu'elles nous envoient obliquement de certains points ne sera pas détruite par celle des rayons qui manquent, et pourra être observée. Or, Arago n'a pu discerner la moindre trace de polarisation dans la lumière des étoiles variables; d'où il a conclu qu'il est très probable que leur lumière émane, comme celle du soleil, d'une enveloppe gazeuse.

II. Réfraction de la lumière polarisée, et théorie de la polarisation par réfraction.

2375. La lumière réfractée est complémentaire de la lumière réfléchie. — Quand un rayon polarisé *par un moyen quelconque* tombe sur la surface d'un milieu transparent, une partie est réfléchie, et l'autre transmise. Fresnel a admis que la somme des intensités de ces deux parties est égale à l'intensité du faisceau incident, ce qui suppose qu'il n'y a aucune perte à la surface. Ce principe résulte de la théorie; car si l'on calcule l'intensité du rayon réfracté, au moyen des formules qui donnent la vitesse de vibration dans ce rayon (2358), on trouve le même résultat qu'en retranchant l'intensité du rayon réfléchi de celle du rayon incident. De plus, Arago, par des procédés photométriques que nous décrirons bientôt (2391), a vérifié expérimentalement ce principe, sur le verre.

Il résulte de là qu'un rayon totalement polarisé perpendiculairement au plan d'incidence et tombant sous l'angle de polarisation, est entièrement transmis, puisqu'il ne donne pas de rayon réfléchi. C'est donc quand les vibrations s'accomplissent dans le plan d'incidence, et qu'elles font avec la surface un angle égal à l'angle de polarisation, qu'elles se transmettent le plus facilement à l'éther du second milieu. Ces conséquences peuvent aussi se déduire des formules suivantes de Fresnel.

2376. Intensité du rayon réfracté fourni par un rayon polarisé. — D'après ce qui précède, on pourra calculer l'intensité du rayon réfracté, en retranchant de l'intensité 1 du rayon incident celle du rayon réfléchi. Donc, en conservant les mêmes notations, et désignant par T l'intensité du rayon transmis, on aura, pour le cas général (2360)

$$T = 1 - a^2 \cos^2\alpha - b^2 \sin^2\alpha = 1 - \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2\alpha - \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2\alpha.$$

En introduisant dans cette formule les valeurs que prennent a^2 et b^2 dans les différents cas particuliers que nous avons examinés, et faisant varier α, il sera facile de trouver les diverses valeurs correspondantes de T.

2377. Changement du plan de polarisation par la réfraction. — Décomposons, comme dans le cas de la réflexion (2361), la vitesse de vibration du rayon incident en deux autres, dirigées, l'une dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire. La tangente du nouvel angle du plan de polarisation avec le plan d'incidence sera égale au rapport de ces composantes. Or, les valeurs de ces composantes sont $u \sin \alpha$ et $u' \cos \alpha$; u et u' ayant les valeurs calculées aux nos 2358 et 2359 ; on aura donc

$$\tang \alpha' = \frac{u}{u'} \tang \alpha = \frac{1}{\cos(i-r)} \tang \alpha ; \quad \text{ou } \cot \alpha' = \cos(i-r) \cot \alpha ;$$

formule que M. Brewster avait déduite antérieurement d'un grand nombre d'expériences. On voit que $\cot \alpha$ est plus grand que $\cot \alpha'$, puisque le cosinus est toujours plus petit que 1 ; α' est donc plus grand que α ; donc la réfraction écarte le plan de polarisation du plan d'incidence, et d'autant plus que i est plus grand, car $i-r$ augmente, et par conséquent $\cos(i-r)$ diminue, quand i augmente. Pour $\alpha' = 45°$, on a $\cos \alpha' = \cos(i-r)$, et pour $\alpha = 90°$, $\cos \alpha' = 0$; d'où $\alpha' = 90°$. Le plan de polarisation ne change donc pas d'azimut quand les mouvements vibratoires se font dans le plan d'incidence.

2378. Changement du plan de polarisation par une pile de glaces. — Si nous supposons que le rayon réfracté émerge par une face parallèle à la première, et si nous appelons α'' le nouvel azimut du plan de polarisation, nous aurons $\cot \alpha'' = \cos(i-r) \cot \alpha' = \cos^2(i-r) \cot \alpha$. Pour une seconde plaque, on aurait $\cot \alpha''' = \cos^3(i-r) \cot \alpha, ..$; et après un trajet du rayon à travers m plaques, en subissant $2m$ réfractions, $\cot \alpha_{2m} = \cos^{2m}(i-r) \cot \alpha$. On voit que $i-r$ étant moindre que 90°, $\cot \alpha_{2m}$ ne sera nul que pour un nombre infini de plaques ; le plan de polarisation ne pourra donc jamais être exactement perpendiculaire au plan d'incidence. M. Brewster, qui a vérifié la formule précédente au moyen d'un grand nombre d'expériences, a trouvé que, pour $\alpha = 45°$, des piles de 8 plaques sous l'incidence de 78° 52′, de 24 plaques sous l'incidence de 61°, et de 47 plaques sous l'incidence de 43° 34′, amènent le plan de polarisation du rayon émergent dans une position qui ne s'écarte pas d'une manière appréciable de la perpendiculaire au plan d'incidence. La formule donne pour les angles des deux plans 88° 50′, 89° 38′ et 88° 27′.

2379. EXPLICATION DE LA POLARISATION PAR RÉFRACTION. — Si nous considérons un faisceau de lumière naturelle, comme composé de deux faisceaux d'égale intensité polarisés à angle droit, et si nous nous reportons à ce qui a été dit dans le cas de la réflexion (2363), nous aurons pour l'intensité du rayon réfracté, $t = 1 - \frac{1}{2}(a^2 + b^2)$. Cette formule pourrait se trouver, comme dans le cas de la réflexion, en partant des intensités calculées quand le rayon est

polarisé dans le premier et dans le second azimut ; mais ce serait plus compliqué.

Le faisceau partiel polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, donne un faisceau $(1-b^2)$ plus intense que celui, $(1-a^2)$, qui est polarisé dans ce plan, puisque l'on a $a^2 > b^2$ (2364). Les vibrations dans ce dernier plan sont donc plus nombreuses que dans le plan perpendiculaire ; de là la polarisation partielle du rayon réfracté.

Le mouvement du plan de polarisation peut aussi servir à expliquer la polarisation par réfraction, au moyen d'un raisonnement synthétique semblable à celui que nous avons employé pour la réflexion (2365). On voit que la polarisation ne peut être que partielle, un mouvement vibratoire ne pouvant être amené à être perpendiculaire au plan de réfraction, que lorsqu'il se trouve déjà perpendiculaire à ce plan dans le rayon incident (2377).

On peut, du reste, calculer les azimuts des plans de polarisation des deux rayons partiels qui composent un rayon naturel, en supposant qu'ils forment des angles de 45° avec le plan d'incidence. Il suffit de faire $\alpha = 45°$, dans la formule $\cot \alpha' = \cos(i-r) \cot \alpha$; et elle devient $\cot \alpha' = \cos(i-r)$, formule qui montre que α' est toujours plus grand que $\alpha = 45°$, mais qu'il ne peut jamais devenir égal à 90°. Les plans de polarisation des deux rayons partiels seront donc simplement rapprochés de l'azimut de 90°. Si le rayon traverse une pile de plaques, les azimuts des plans de polarisation seront donnés par la formule $\cot \alpha_{2m} = \cos^{2m}(i-r)$, et la lumière naturelle qui traverserait des piles de 8, 24 ou 47 lames de verre dans les conditions indiquées ci-dessus (2372), paraîtrait complètement polarisée dans le second azimut ; c'est, en effet, ce qu'a constaté M. Brewster.

2380. Quantité de lumière polarisée contenue dans le rayon réfracté. — Si l'on considère un rayon naturel comme composé de deux rayons d'intensité $\frac{1}{2}$, polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement, les intensités des rayons réfractés qu'ils fournissent seront $\frac{1}{2}(1-a^2)$ et $\frac{1}{2}(1-b^2)$. En les retranchant l'une de l'autre, on aura la quantité de lumière polarisée dans l'azimut de 90°. La différence est $\frac{1}{2}(1-b^2-1+a^2) = \frac{1}{2}(a^2-b^2)$, expression qui représente aussi, comme nous l'avons vu (2364), la quantité de lumière polarisée dans le rayon réfléchi. Nous retrouvons donc ici la loi d'Arago sur l'égalité des quantités de lumière polarisées dans les deux rayons (2369). La *proportion* de lumière polarisée dans le rayon réfracté est représentée par la formule

$$\frac{\frac{1}{2}(a^2-b^2)}{1-\frac{1}{2}(a^2+b^2)}.$$

§ 3. — POLARISATION PAR DOUBLE RÉFRACTION, ET THÉORIE DE LA DOUBLE RÉFRACTION.

I. Polarisation par double réfraction, et double réfraction de la lumière polarisée.

2381. Polarisation dans les cristaux à un axe. — Quand un rayon de lumière naturelle se bifurque dans un cristal à un axe, le rayon ordinaire est polarisé dans la section principale, et le rayon extraordinaire, dans un plan perpendiculaire à cette section. Cette loi se constate facilement au moyen d'un polariscope, quand on connaît la direction de la section principale correspondante à la face d'incidence. Ce caractère sert à distinguer facilement le rayon ordinaire du rayon extraordinaire; par exemple, quand on veut savoir si un cristal est positif ou négatif. Ici encore se montre la réciprocité entre les polariscopes et les polarisateurs; car un prisme de Nicol polarise la lumière naturelle qui le traverse, dans un plan perpendiculaire à sa section principale; et le rayon ordinaire ne peut émerger. Une lame de tourmaline parallèle à l'axe ne laisse aussi passer que le faisceau extraordinaire, et ce faisceau est polarisé dans un plan perpendiculaire à l'axe ; de manière qu'il traversera le plus facilement une seconde tourmaline, quand elle aura son axe parallèle à celui de la tourmaline polarisante; et, au contraire, toute lumière sera interceptée quand ces tourmalines auront leurs axes perpendiculaires. Pour expliquer l'absorption du rayon ordinaire, on a comparé la tourmaline à une pile de glaces, en la considérant comme formée de lamelles superposées; le rayon ordinaire polarisé dans le plan d'incidence par les premières lamelles serait ensuite arrêté par les suivantes. C'est Biot qui a découvert les propriétés de la tourmaline. Antérieurement, M. Brewster avait constaté des propriétés semblables dans les agates formées de couches superposées, et taillées en lame perpendiculaire aux couches ; les rayons sont polarisés perpendiculairement à ces couches.

2382. Polarisation dans les cristaux à deux axes. — Dans ces sortes de cristaux, les deux rayons sont polarisés dans des plans sensiblement perpendiculaires l'un à l'autre. Dans le cas particulier où le plan d'incidence se confond avec une des sections principales ou avec le plan des axes, il y a un des rayons qui suit la loi de Descartes, et qui peut par conséquent se nommer *rayon ordinaire*. Ce rayon est polarisé dans le plan de la section principale et l'autre dans un plan perpendiculaire. On nomme cristaux *positifs*, ceux chez lesquels le rayon extraordinaire est le plus dévié, et cristaux *négatifs*, ceux chez lesquels il est le moins dévié.

Quand le plan d'incidence a une position quelconque, le plan de la polarisation est plus difficile à trouver. Cependant Biot le détermine approximativement en menant par le rayon réfracté un plan passant par chacun des deux

axes optiques. L'angle dièdre de ces deux plans est divisé en deux parties égales par le plan de polarisation de l'un des rayons.

Il résulte de la polarisation des deux rayons à angle droit, que lorsqu'on forme des *piles de mica* (2336) il faut avoir soin de placer les lames de manière qu'elles aient toutes une section principale dans le plan de réfraction ; alors elles se comportent comme de simples glaces, et la double réfraction ne joue pas de rôle ; mais si les lames étaient placées au hasard, leurs effets se contrarieraient plus ou moins.

2383. DOUBLE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE POLARISÉE. — Quand un rayon de lumière naturelle traverse un cristal à un axe ne présentant pas, comme la tourmaline, de propriétés exceptionnelles, les rayons ordinaire et extraordinaire émergent avec des intensités égales, la perte par absorption étant supposée négligeable. Mais si la lumière a été polarisée par un moyen quelconque, le faisceau se partage encore en deux autres polarisés à angle droit, mais ayant des intensités généralement inégales. Quand la section principale contient le plan de polarisation, le rayon extraordinaire est éteint, et toute la lumière passe dans le rayon ordinaire. Quand la section principale est perpendiculaire à ce plan, le rayon ordinaire disparaît à son tour ; et quand les deux plans forment un angle de 45°, les deux rayons sont égaux. La *figure* 1714 montre comment se succèdent les deux images, quand le prisme bi-réfringent tourne de 180°. *pr* est la direction du plan de polarisation ; l'image ordinaire *o* ne change pas de position, tandis que l'image extraordinaire *e* tourne autour d'elle. Les résultats sont les mêmes dans deux positions du prisme différant de 180° ; les images sont représentées en lignes ponctuées quand elles disparaissent. L'expérience se fait facilement avec l'appareil de Biot (*fig.* 1706), auquel on ajuste un polariscope bi-réfringent.

Fig. 1714.

2384. Loi de Malus, ou du carré du cosinus. — Quand on fait varier l'angle du plan de polarisation avec la section principale, les images ordinaire et extraordinaire changent d'intensité en sens inverse, sont égales quand l'angle est de 45°, et disparaissent, la première, quand l'angle est nul, et la seconde, quand il est égal à 90°. Malus a représenté les intensités O et E des deux rayons par les formules

$$O = I \cos^2 \alpha \qquad E = I \sin^2 \alpha$$

dans lesquelles I est l'intensité du rayon incident, et α l'angle du plan de polarisation avec la section principale. Ces formules donnent bien les intensités dans les cas particuliers de $\alpha = 0$, $\alpha = 45°$ et $\alpha = 90°$. Nous verrons comment la théorie des ondulations y conduit ; et, en outre, Arago puis M. E. Becquerel ont reconnu par des moyens que nous décrirons plus loin (2392), qu'elles représentent très exactement les résultats de l'expérience.

2385. Expérience des rhomboèdres superposés. — Nous avons vu (2338) que c'est dans les rayons bifurqués par le spath d'Islande, que Huyghens a découvert qu'un rayon de lumière peut posséder des propriétés différentes sur ses divers côtés. Nous allons décrire l'expérience curieuse qu'il faisait à ce sujet, expérience dont les résultats sont faciles à concevoir, d'après ce qui précède. Supposons deux rhomboèdres superposés et placés sur un point noir. On verra en général quatre images, chaque rayon émergeant du premier cristal se bifurquant dans le second. Mais dans certaines positions relatives des deux rhomboèdres, dont les faces de contact sont représentées l'une en ligne pleine, l'autre en ligne ponctuée sur la *figure* 1715, deux des images disparaîtront. On a désigné par *o* et *o'* celles qui proviennent du rayon ordinaire sortant du premier rhomboèdre, et par *e*, *e'* celles qui proviennent du rayon extraordinaire; la lettre accentuée désignant l'image extraordinaire produite par la seconde réfraction. Les quatre images forment un losange dont



Fig. 1715.

les côtés restent constants, et dont les angles varient. Quand les sections principales sont parallèles en même temps que toutes les arêtes des deux spaths, il n'y a que deux images. Il en est de même quand le cristal supérieur a tourné de 90°. Quand il a tourné de 180°, il n'y a plus que les deux images *o* et *e*, qui coïncident si les deux cristaux ont la même épaisseur, parce que les déviations s'y font en sens contraire.

Tous ces résultats peuvent se déduire de la formule de Malus. En appelant O_o, O_e les intensités des deux images données par le faisceau ordinaire qui sort du premier rhomboèdre, et E_o, E_e les intensités de celles qui sont fournies par le faisceau extraordinaire, on aura

$$O_o = \tfrac{1}{2}\,I\cos^2 i,\quad O_e = \tfrac{1}{2}\,I\sin^2 i,\quad \text{et}\quad E_o = \tfrac{1}{2}\,I\sin^2 i,\quad E_e = \tfrac{1}{2}\,I\cos^2 i,$$

I étant l'intensité du rayon incident, et $\frac{1}{2}$ I celle des rayons qui sortent du premier spath. Si la lumière incidente était polarisée, les intensités de ces deux derniers rayons ne seraient plus $\frac{1}{2}$ I, mais $I\cos^2 i'$ et $I\sin^2 i'$, i' étant l'angle de la section principale du premier spath avec le plan de polarisation des rayons incidents ; et il faudrait remplacer $\frac{1}{2}$ I par ces valeurs, dans les formules précédentes.

Comme il est assez rare de trouver des spaths bien purs et assez épais pour que les images soient suffisamment séparées, on fait souvent les expériences qui précèdent au moyen de deux prismes de spath parallèles à l'axe, et à angle

très petit. On peut alors, en employant un pinceau de lumière intense, projeter les quatre images sur un écran.

2386. Polariscopes à deux images. — Dans bien des cas, il est nécessaire d'observer en même temps les deux images données par les polariscopes bi-réfringents; on voit ainsi simultanément les effets produits dans des azimuts différant de 90°, ce qui permet des comparaisons souvent précieuses. On peut employer pour cela le prisme de Rochon (2324). Mais les images sont trop peu écartées pour certaines expériences.

Prisme de Wollaston. — Ce prisme écarte beaucoup les images; il est composé de deux prismes de cristal de roche, disposés comme ceux de Rochon, seulement le prisme antérieur est taillé de manière que l'axe soit parallèle à la face d'incidence, tout en restant perpendiculaire aux arêtes. Le second prisme a toujours ses arêtes parallèles à l'axe. Il résulte de cette disposition, qu'un rayon qui entre perpendiculairement à la face d'incidence, ne se bifurque pas dans le premier prisme, mais se compose néanmoins de deux rayons superposés, de vitesse différente (2318, 2°), la vitesse du rayon extraordinaire étant la plus petite, puisque le cristal est positif. Le rayon ordinaire, polarisé dans la section principale, c'est-à-dire dans la section droite du prisme, ne donnera donc, à son entrée dans le second, qu'un rayon extraordinaire, la section principale de ce second prisme étant parallèle aux arêtes, et ce rayon sera dévié en se rapprochant de la normale, puisque le cristal est positif. Le rayon extraordinaire du premier prisme ne donnera que son rayon ordinaire, et comme sa vitesse était minimum (2321), elle augmentera en passant dans le second prisme, et ce rayon s'écartera de la normale d'une quantité égale à celle dont l'autre s'en était rapproché. A l'émergence, une nouvelle déviation en sens inverse pour les deux rayons, doublera encore l'angle de bifurcation. Remarquons que si l'on fait tourner le prisme sur lui-même, aucune des deux images ne restera fixe. On voit que, si l'on emploie ce prisme comme polariscope, l'un des rayons superposés dans le premier prisme disparaîtra, ainsi que le rayon qu'il donne dans le second, quand le plan de polarisation sera perpendiculaire ou parallèle aux arêtes.

II. Applications de la polarisation par double réfraction, à la photométrie et à la polarimétrie.

2387. Arago a imaginé, en partant de la loi de Malus ou du carré du *cosinus* (2384), une méthode photométrique, qu'il a publiée en 1833, au moyen de laquelle il a pu soumettre au contrôle de l'expérience, plusieurs résultats théoriques cités dans ce chapitre, et qui lui a servi ensuite à comparer les intensités de différentes sources naturelles de lumière. Ne voulant pas s'appuyer sur une loi déduite seulement de la théorie, il a d'abord soumis la loi du cos^2 à de nombreuses épreuves expérimentales. Pour cela, il a com-

mencé par construire une table des intensités de la lumière réfléchie sous diverses incidences, par une lame de verre; puis, il a comparé à ces intensités celles que lui donnait un prisme bi-réfringent [1].

2388. Appareil photométrique d'Arago. — F (*fig.* 1716) est une feuille de papier tendue verticalement et éclairée uniformément par derrière, et V une glace à faces bien parallèles perpendiculaire à la feuille et fixée à une certaine distance. Un tube T, muni d'un diaphragme présentant une fente verticale, peut tourner dans un plan horizontal, avec la régle *on* à laquelle il est fixé, de manière à former avec le plan de la glace V des angles mesurés sur l'arc divisé fixe *a*, au moyen d'un vernier mobile avec la régle. *t* est un

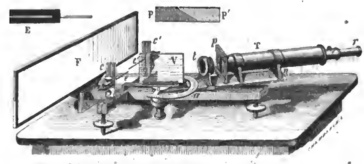


Fig. 1716.

anneau, dans lequel peut tourner un autre anneau, de quantités angulaires mesurées par une division. Le système *t*, qui ne sert que pour certaines expériences, peut se fixer, au moyen d'une vis de pression, en différents points de la régle *on*. Deux écrans noircis placés en *e* et *e'*, et dont un est représenté à part en E, laissent arriver dans le tube T, par une fente horizontale, l'un, celui qui est en *e*, la lumière venant de la feuille F transmise à travers la glace; l'autre, la lumière réfléchie par cette glace. Ces deux écrans peuvent être fixés par des vis de pression, à différentes hauteurs sur les supports *c*, *c'*. L'un des écrans étant un peu plus élevé que l'autre, il est facile de comparer les intensités des images des deux fentes. Si donc on écarte graduellement le tube T, du plan de la glace V, la quantité de lumière réfléchie diminuant pendant que la quantité transmise augmente, on finira par trouver une position pour laquelle les images des deux fentes paraîtront égales. La lumière transmise sera alors égale en intensité à la lumière réfléchie.

Au lieu d'écrans munis de fentes, Arago a le plus souvent disposé sur les supports *c*, *c'*, des broches horizontales noircies *e*, *e'* qui, regardées à travers le tube, interceptaient, l'une, *e'*, la partie du faisceau réfléchi, l'autre, *e*, celle

[1] *Œuvres complètes de F. Arago* (*Mémoires scientifiques*), t. I, p. 151.

du faisceau transmis, venant des points de l'écran sur lesquels leur image se projetait ; de manière que l'œil ne recevant dans la direction des broches qu'une espèce de lumière, ces lumières sont d'égale intensité quand les broches paraissent également sombres.

Des expériences faites en transportant la feuille F dans son propre plan, ou en l'inclinant par rapport à la lame de verre V, ont donné les mêmes résultats ; ce qui prouve que les différentes parties de la feuille ont le même éclat. Du reste, pour n'avoir pas à supposer cette égalité, on fait toujours deux observations, l'une en plaçant le tube T d'un côté de la lame V, l'autre en le plaçant du côté opposé, et l'on prend la moyenne. De même, pour se mettre à l'abri des inégalités de sensibilité de la rétine, sur laquelle les images des fentes se peignent l'une au-dessus de l'autre, on répète chaque observation, en changeant les positions des fentes ou des broches, de manière à mettre en dessus celle qui était au-dessous de l'autre, et *vice versâ*, et l'on prend la moyenne. Remarquons que les distances à la glace, des parties de la feuille F d'où partent les rayons, n'ont pas d'influence sur les intensités des images, puisqu'il s'agit d'une surface, et non d'un point lumineux (1880). Rappelons enfin que, si des rayons réfléchis à la seconde surface, ou ayant éprouvé plusieurs réflexions, s'ajoutent au rayon réfléchi à la première surface, le rayon transmis est aussi accompagné de rayons qui ont éprouvé deux ou un plus grand nombre de réflexions entre les deux surfaces avant d'émerger.

2389. Mesure de la proportion de lumière réfléchie par une glace à faces parallèles. — L'appareil qui précède a donné le nombre 11° 8', pour l'angle des rayons avec la surface de la glace, quand les images réfléchie et transmise étaient égales.

Quand on veut ensuite trouver l'incidence pour laquelle l'intensité du faisceau réfléchi est la moitié, le quart..., ou bien le double, le quadruple, de celle du faisceau transmis, on dédouble l'un des faisceaux, au moyen d'un prisme de cristal de roche placé en *p* (*fig.* 1716), et dont on incline la section principale par rapport au plan d'incidence sur la glace, de manière à obtenir deux faisceaux de même intensité, malgré l'état de polarisation que les rayons ont reçu dans leur rencontre avec la glace. On déplace ensuite le tube T jusqu'à ce que l'une des deux images séparées par le prisme, soit égale à celle que forme le faisceau qui ne l'a pas traversé. Comme la lumière du premier faisceau a été ainsi réduite de moitié, son intensité, avant de traverser le prisme, était double de celle de l'autre.

Pour éviter l'erreur provenant des pertes de lumière par réflexion aux deux faces du prisme, Arago le formait de deux plaques de cristal de roche taillées en biseau et collées l'une à l'autre, comme on le voit en PP' (*fig.* 1716) avec de l'essence de térébenthine, dont la présence rend insensible la réflexion aux faces de jonction. Les faces de l'une des plaques, P, sont perpendiculaires à l'axe du cristal, tandis que les arêtes du biseau de l'autre, P', sont parallèles à cet axe. La double plaque est fixée en *p*, de manière que le faisceau qui forme

l'une des images la traverse sans rencontrer le biseau, et par conséquent sans se bifurquer, tandis que l'autre rencontre la surface de jonction et se bifurque. De cette façon les faisceaux éprouvent, à l'entrée et à la sortie de la double plaque, des pertes proportionnelles à leur intensité.

En plaçant un second prisme dans le trajet d'un des rayons séparés par le premier, et l'inclinant convenablement sur la section principale de ce dernier, on peut comparer $\frac{1}{4}$ d'un des rayons, à l'autre tout entier ; et ainsi de suite. — Quand on a l'incidence pour laquelle l'intensité r de la lumière réfléchie est égale à n fois l'intensité t de la lumière transmise, on en conclut la proportion $nt : (nt + r)$ de la lumière réfléchie nt, à la lumière incidente $nt + r$.

2390. Table des réflexions. — La vue d'Arago était très affaiblie quand il se livrait à ces importantes recherches. C'est pourquoi il avait confié à MM. Laugier et Petit, l'exécution de ses expériences. Ce sont donc ces deux observateurs qui ont obtenu les résultats numériques dont il nous reste à parler. Après avoir pris six déterminations comprises entre les angles de 4° et 26° avec la surface, ils ont calculé, au moyen des formules ordinaires d'interpolation, les quantités de lumière réfléchies et transmises par une lame de verre, pour chaque degré d'inclinaison compris entre les angles sur lesquels ils avaient expérimenté ; ils ont ainsi formé une table, qui convient spécialement à la lame de verre dont ils faisaient usage.

Dans le cas des incidences voisines de la normale, il leur a fallu employer le moyen indirect suivant, en se servant de la table construite jusqu'à 26° : on place dans le trajet des rayons qui doivent être transmis à travers la glace V, une plaque de même matière, plus ou moins inclinée par rapport à ces rayons, et qui les affaiblit, en en réfléchissant une partie qu'il s'agit d'évaluer. Pour cela, on cherche, en déplaçant le tube T, sous quel angle α la lumière réfléchie est égale à la lumière transmise provenant du faisceau affaibli par la seconde lame, et l'on trouve dans la table, les quantités r et t de lumière réfléchie et transmise sous l'inclinaison α. Si maintenant on représente par 1 l'intensité du faisceau incident non modifié, et par i celle d'un faisceau égal après qu'il a été affaibli par la lame auxiliaire, ce faisceau aura, d'après la table, l'intensité it après son passage à travers la glace V ; et comme il est alors égal au faisceau réfléchi r, on aura $r = it$, d'où $i = r : t$. Le rapport $r : t$ représente donc l'intensité du rayon transmis par la lame auxiliaire, et $1 - (r : t)$, celle du faisceau réfléchi par cette lame sous l'angle qu'elle forme avec le faisceau, angle qui peut être aussi rapproché que l'on veut de 90°.

2391. Il ne s'éteint pas de lumière dans la réflexion et la réfraction des corps transparents. — Ce principe important (2375) est nécessaire pour la vérification de la loi du cos^2. Voici comment Arago l'a établi : Le tube T (*fig.* 1716) formant un angle de 11° 8′ avec la surface de la plaque, auquel cas les images réfléchie et transmise sont égales, on place dans le trajet des rayons qui doivent être transmis, une seconde lame de verre parallèle à la première, et assez éloignée pour renvoyer à celle-ci de la lumière

réfléchie. La plaque fixe reçoit ainsi, au lieu du faisceau direct, la somme des faisceaux transmis et réfléchi par la lame auxiliaire. Or, cette somme est égale au faisceau direct, car c'est toujours sous l'angle de 11° 8′ que les images des deux fentes sont égales. Il en est encore de même quand la lame auxiliaire est inclinée par rapport à la plaque fixe. On doit donc conclure de là que la somme des intensités des faisceaux transmis et réfléchi est égale à l'intensité du faisceau incident.

2392. Vérification de la loi du carré du cosinus. — Une des fentes est placée un peu au-dessus de la plaque de verre V (*fig.* 1716), de manière à laisser passer des rayons venant directement du papier éclairé. L'autre fente, placée un peu plus bas, donne passage aux rayons réfléchis par la plaque. On partage le faisceau direct en deux autres égaux entre eux, au moyen d'un prisme bi-réfringent fixé en *t*. On reçoit le faisceau ordinaire sur un second prisme parallèle au premier. Ce faisceau se bifurque à son tour, et il s'agit de vérifier si l'intensité du rayon ordinaire qu'il fournit varie proportionnellement au *carré du cosinus* de l'angle que font entre elles les sections principales des deux prismes. Pour cela, on déplace le tube T jusqu'à ce que l'intensité de la lumière réfléchie soit égale à celle de la lumière venant directement de l'écran transmise à travers les prismes. Or, la première intensité se trouve dans la table; la seconde est donc aussi connue. On fait de même en inclinant différemment les sections principales des prismes l'une par rapport à l'autre, et l'on compare les valeurs obtenues à celles que l'on déduit de la loi du cos^2. Les expériences ont donné un accord très satisfaisant entre les deux séries de résultats; les différences n'allaient qu'à quelques centièmes.

Indiquons quelques-uns des résultats photométriques obtenus, sous la direction d'Arago, en s'appuyant sur la loi du carré du *cosinus*.

2393. Il ne s'éteint pas de lumière dans la réflexion totale. — Bouguer admettait qu'il y avait dans la réflexion totale une perte d'environ $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{5}$ de la lumière incidente. M. Potter a trouvé que cette perte est insensible, et le photomètre d'Arago a conduit au même résultat. Voici comment on procède : on suit la même marche que pour trouver la proportion de lumière réfléchie dans les incidences très obliques (2390), en remplaçant la lame auxiliaire par un prisme dans lequel la lumière est réfléchie totalement, puis traverse la glace V (*fig.* 1716), en se substituant à la lumière directe qui était transmise. On trouve que, pour qu'il y ait égalité entre les deux images, il faut que le tube T ait la même position qu'avant l'interposition du prisme. La lumière réfléchie dans ce dernier, a donc la même intensité que celle qui vient de la feuille de papier; il n'y a donc pas de perte dans la réflexion totale, ou du moins la perte ne va pas à $\frac{1}{1000}$ de la lumière incidente. Il est essentiel de placer sur le trajet des rayons réfléchis par la glace V, une plaque de verre dans laquelle les rayons parcourent le même trajet que dans le prisme, afin de compenser les pertes à l'entrée et à la sortie de ce dernier, et celles qui peuvent provenir de l'absorption.

2394. Pouvoir réflecteur des métaux. — Si l'on remplace le prisme à réflexion totale, par un miroir métallique, on substituera aux rayons directs transmis, les rayons réfléchis par ce miroir, et l'on pourra comparer l'intensité de ces rayons, à celle de la lumière réfléchie par la glace (intensité donnée par la table), et par conséquent à l'intensité de la lumière incidente. Cette méthode a été appliquée au platine, à l'acier, au métal des miroirs, et l'on a constaté de nouveau que la proportion de lumière réfléchie augmente avec l'angle d'incidence.

2395. Intensité des étoiles, du soleil. — Arago a encore appliqué la loi du cos^2 à la comparaison des intensités des principales étoiles. L'instrument destiné à cet usage n'est autre chose que la lunette de Rochon (2325), devant l'oculaire de laquelle est disposé un prisme de Nicol pouvant tourner sur lui-même de quantités angulaires mesurées sur un cercle gradué. Quand le prisme de Nicol et celui que contient la lunette ont leur section principale dans le même plan, on ne voit que l'image ordinaire de l'étoile, polarisée dans ce plan. Si l'on fait tourner peu à peu le prisme de Nicol, on voit bientôt apparaître la seconde image, et cela a lieu quand son éclat commence à dépasser celui du ciel, sur lequel elle se projette. Soit α l'angle que font alors les sections principales des deux prismes. On fait de même avec une autre étoile, et si α' est l'angle des deux plans quand la seconde image commmence à apparaître, et I, I' les intensités des deux étoiles, on aura $I \sin^2\alpha = I' \sin^2\alpha'$; d'où $I : I' = \sin^2\alpha' : \sin^2\alpha$. Nous prenons les *sinus* au lieu des *cosinus*, parce qu'il s'agit de l'image extraordinaire.

On peut encore procéder en affaiblissant la lumière de l'étoile la plus brillante, jusqu'à ce que sa seconde image apparaisse, dans le même état de l'instrument que la plus faible. Pour cela, on place devant l'objectif une lame de verre inclinée par rapport à l'axe de la lunette, et qui affaiblit les rayons incidents, d'après l'obliquité, dans une proportion donnée par une table construite comme nous l'avons expliqué plus haut (2390). — Voici les moyennes de quelques mesures ; les intensités de *sirius* et d'*acturus*, qui sont les étoiles les plus brillantes, sont prises pour terme de comparaison et représentées par 1000 :

procyon	*béteigneuse*	*rigel*	*wéga*	*altair*	*aldébaran*	*l'épi*
444	411	402	394	338	219	158

Intensité aux différents points de la surface du soleil. — Le prisme de Rochon étant placé de manière que le bord d'une des images du soleil passe par le centre de l'autre, on a trouvé, en faisant tourner le prisme de Nicol, que l'image extraordinaire commence à paraître, au même moment, sur le bord et au centre de l'image ordinaire. Ce qui montre que l'éclat de cette dernière image est partout le même. Bouguer avait annoncé que l'éclat du centre était à celui du bord comme 48 est à 35. S'il en était ainsi, le prisme

de Nicol devrait tourner de 1° 29′, pour passer de la position où le bord de l'image extraordinaire commencerait à s'apercevoir sur le bord de l'image ordinaire, à celle où il commencerait à se distinguer près du centre. La différence d'intensité annoncée par divers observateurs et dont nous avons parlé, ne paraît donc pas exister pour les rayons lumineux ; mais elle est réelle quant aux effets calorifiques et chimiques de ces rayons (II,1097).

2396. Photomètre de M. Becquerel [1], — La loi du *cos*² a servi aussi de point de départ à M. E. Becquerel pour la construction du photomètre suivant : AO, BrO (*fig.* 1717), sont deux petites lunettes ayant même oculaire O, dont une BrO, est coudée, les rayons qui la traversent éprouvant la réflexion totale dans un prisme de verre *r* mobile avec le tube T. Les lumières à comparer sont placées à la même distance des objectifs A et B. En P et P′, sont deux prismes de Nicol (2337), que traversent les rayons de la lumière la plus intense entrant en A. Quand ces deux prismes ont leurs sections principales parallèles, cette lumière n'est pas sensiblement affaiblie ; mais si l'on fait tourner le prisme P′ d'une quantité α mesurée sur le cercle divisé C, l'intensité de cette lumière est affaiblie proportionnellement à *cos*² α ; de manière qu'on peut rendre égales en intensité, les images de deux fentes que traversent les rayons, et qu'on amène à être en contact en déplaçant un peu le prisme réflecteur *r*.

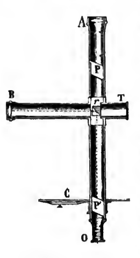


Fig. 1717. — 1/6.

Les lumières comparées doivent être tout-à-fait neutres, et pour bien juger de l'égalité, il faut que la différence des intensités ne soit ni trop grande ni trop faible. La source la plus intense étant une lampe Carcel qui servait de terme de comparaison, M. E. Becquerel a trouvé que, si l'angle α est compris entre 30 à 40′, et 45 à 50°, l'erreur ne dépasse guère $\frac{1}{50}$ de l'intensité de la plus faible source.

C'est au moyen du photomètre que nous venons de décrire que M. E. Becquerel a comparé les intensités lumineuses des corps phosphorescents, quand la lumière qu'ils répandaient n'était pas trop faible (2086). — Il a aussi fait servir le même instrument à la vérification de la loi du *cos*² : la lampe étant placée successivement à différentes distances, *d*, et l'autre source étant constante, il a constaté que le produit *d cos*² α présente toujours la même valeur quand l'angle α est tel que les deux images présentent toujours la même intensité.

2397. Polarimètres. — On nomme *polarimètres*, des instruments destinés à mesurer la *proportion* de lumière polarisée contenue dans un faisceau de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXII, p. 14.

lumière. La méthode qu'on emploie généralement consiste, au fond, à dépolariser le faisceau en y introduisant une quantité égale de lumière polarisée à angle droit, de manière à le rendre complètement neutre; la quantité de lumière introduite représente alors celle qui a été détruite.

Arago se sert pour cela d'une pile de glaces placée à l'extrémité du tube de son polariscope à lunules (2337). La pile étant placée de manière que le plan d'incidence du faisceau à analyser coïncide avec le plan de polarisation, on fait varier peu à peu l'inclinaison de cette pile, jusqu'à ce que la double image donnée par le polariscope soit complètement exempte de couleurs. Une table, que nous allons apprendre à construire, donne la proportion de lumière que polarise la pile dans la position qu'on lui a donnée, et par conséquent, la quantité polarisée que contenait le faisceau incident. La *figure* 1718 représente le polarimètre d'Arago. En *c* est la lame de cristal de roche, et en *o* le prisme bi-réfringent. P est la pile de glaces, dont on mesure l'inclinaison sur l'axe du tube, au moyen de l'arc divisé *a*. En A est un cercle gradué fixé au tube, et qui tourne avec lui. Un niveau à bulle d'air, muni d'un vernier *v* et tournant dans le plan du cercle, fait connaître, quand il est placé bien horizontalement, l'angle que fait l'axe du tube avec l'horizon, pour les expériences sur la polarisation de l'atmosphère. Une bande de drap noir *n* intercepte les rayons qui se réfléchiraient sur la première glace et viendraient se mêler aux rayons transmis. L'instrument peut se tenir à la main, ou être articulé sur un pied.

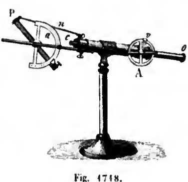


Fig. 1718.

Graduation du polarimètre. — Pour graduer le polarimètre, il faudrait neutraliser successivement avec la pile, des faisceaux contenant des proportions connues de lumière polarisée. Voici comment on se procure de semblables faisceaux : on polarise partiellement par réflexion sur un miroir de verre, la lumière émanant d'une surface vivement éclairée, et l'on reçoit cette lumière dans une plaque de cristal de roche *parallèle à l'axe*. On tourne cette plaque dans son propre plan, de manière que son axe fasse un angle α avec le plan d'incidence sur le miroir. Les deux faisceaux restent presque complètement superposés; ils sont polarisés à angle droit, et leurs intensités sont $I \cos^2\alpha$ et $I \sin^2\alpha$, en représentant par I l'intensité du faisceau au moment de son entrée dans la plaque. Si le second est le plus faible, ce qui suppose $\alpha < 45°$, il neutralise ou réduit à l'état de lumière naturelle, une partie égale de l'autre faisceau, ayant pour intensité $I \sin^2\alpha$, qui, jointe à l'intensité du faisceau neutralisant, donne le total $2I \sin^2\alpha$ pour l'intensité du

faisceau naturel. De sorte qu'il ne reste de lumière polarisée, que la quantité $I \cos^2 \alpha - I \sin^2 \alpha = I \cos 2\alpha$. Le rapport de cette quantité à la quantité totale I de lumière émergente, est donc $\cos 2\alpha$, et la proportion de lumière neutre qui s'y trouve mêlée, $2 \sin^2 \alpha$. — Ce faisceau, dont l'état de polarisation est ainsi connu, est reçu dans la pile de glace, tournée de manière que le plan d'incidence coïncide avec le plan de polarisation ; on l'incline jusqu'à ce que le polariscope ne donne plus de coloration, et l'on note l'inclinaison de la pile et la proportion de lumière dépolarisée sous cette inclinaison.

Par cette méthode, M. Laugier a construit une table donnant les inclinaisons sous lesquelles des piles de 1, 2, 3... 10 glaces neutralisent un faisceau contenant diverses proportions de lumière polarisée.

On pourrait graduer la pile, au moyen des formules théoriques qui donnent la proportion de lumière polarisée sous les diverses incidences ; mais l'absorption qui se fait d'une partie de la lumière, rendrait les résultats moins exacts que par la méthode expérimentale directe.

III. Théorie de la double réfraction.

2398. C'est au génie de Fresnel que nous devons la théorie mathématique de la double réfraction. Aprés avoir établi le principe de la direction transversale des vibrations lumineuses, et donné la véritable définition de la lumière polarisée, il put marcher avec succés dans le développement de cette remarquable théorie, au moyen de laquelle, non seulement on a rendu compte de tous les phénoménes et de leurs lois, mais encore on a découvert des faits nouveaux, que l'expérience a ensuite vérifiés. Ne pouvant exposer ici les calculs élevés qui forment le fond de la théorie de Fresnel, nous nous contenterons d'en exposer la marche, et de faire connaître les formules et les résultats auxquels ils ont conduit[1].

2399. Considérations synthétiques. — Voyons d'abord comment Fresnel conçoit la bifurcation d'un rayon, à son entrée dans un cristal bi-réfringent[2]. Les molécules étant inégalement rapprochées dans différentes directions, l'éther éprouve de la difficulté à vibrer dans un sens oblique aux plans des couches moléculaires. Ainsi, dans les cristaux *à un axe*, les mouvements vibratoires s'exécutent facilement dans le sens perpendiculaire et dans le sens parallèle à l'axe ; tandis qu'un mouvement oblique à l'axe, éprouve une résistance qui détermine sa décomposition en deux autres, l'un parallèle, et l'autre perpendiculaire à l'axe. Ces deux mouvements se propagent séparément et avec des vitesses différentes, et, par conséquent, dans des directions différentes (2230), d'où il résulte deux rayons réfractés.

[1] Pour la théorie mathématique, voy. *Traité d'optique physique*, par M. Billet.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVII, p. 179.

Considérons par exemple une lame taillée parallélement à l'axe d'un cristal à un axe, et recevant normalement, un rayon *polarisé dans un plan formant un angle avec la section principale*. Chaque vitesse de vibration (perpendiculaire à ce plan) pourra être décomposée en deux autres, l'une dans la section principale, l'autre perpendiculaire à cette section. La dernière composante appartient au rayon ordinaire, et la première, au rayon extraordinaire. En désignant par 1 la vitesse résultante, les vitesses des composantes seront $\cos \alpha$ et $\sin \alpha$, et les intensités des rayons ordinaire et extraordinaire seront représentées par $\cos^2 \alpha$ et $\sin^2 \alpha$. Nous retrouvons ainsi *la loi de Malus* (2384). Les déplacements parallèles et perpendiculaires à l'axe étant rectangulaires, s'exécuteront d'une manière indépendante, et comme ils se propagent (normalement à leur direction) avec des vitesses différentes, la distance entre deux points correspondants des deux systèmes d'ondes sera proportionnelle à l'épaisseur de cristal qu'ils auront traversée.

S'il s'agit de lumière naturelle, on pourra appliquer le raisonnement qui précède à chaque mouvement élémentaire, et le rayon incident sera divisé en deux autres polarisés dans la section principale et perpendiculairement à cette section, et *ces rayons seront d'intensité égale*, parce que les directions des oscillations dans le rayon incident passent par tous les azimuts pendant un temps très court, de manière que les composantes représentent pendant ce temps, la même somme dans le rayon ordinaire et dans le rayon extraordinaire.

Nous allons maintenant exposer la marche analytique qu'a suivie Fresnel pour expliquer la bifurcation des rayons dans le cas le plus général, tant dans les cristaux à un axe que dans les cristaux à deux axes, et pour déterminer la surface de l'onde, dont la forme peut servir à retrouver les lois de la double réfraction telles qu'elles ont été établies par l'expérience. Fresnel s'est appuyé sur certains principes de mécanique, qui se démontrent analytiquement, et dont nous allons d'abord donner l'énoncé.

2400. Axes et surface d'élasticité. — Quand on dérange une molécule d'éther de sa position d'équilibre, d'une quantité très petite par rapport à sa distance aux molécules voisines, il se développe de l'élasticité, en vertu de laquelle celles-ci se déplacent, puis agissent à leur tour sur celles qui les entourent, et le mouvement se propage ainsi de proche en proche. Si l'élasticité développée entre deux molécules exerce son action dans la direction même du premier déplacement, les déplacements qui se propagent restent parallèles à cette direction ; c'est ce qui a lieu dans les milieux homogènes. Mais dans un milieu non homogène, l'élasticité développée par les déplacements des molécules réagit en général dans une direction différente de celle du déplacement ; de sorte que les déplacements, qui se succèdent sur la ligne de propagation, ont des directions différentes du premier. Cela posé, on démontre par l'analyse mathématique, que :

1° Quelle que soit la loi suivant laquelle varie d'une manière continue l'élasticité autour du point ébranlé, il existe toujours trois directions *rectan-*

gulaires, pour lesquelles chaque molécule réagit suivant la direction même de son déplacement, de manière qu'un déplacement suivant une de ces directions, la conserve pendant qu'il se propage dans un sens perpendiculaire au déplacement. Ces directions privilégiées se nomment *axes d'élasticité*. Dans les milieux cristallisés régulièrement, ces axes sont, pour deux points différents, parallèles deux à deux.

2° On démontre que la force élastique produite par un déplacement peut être remplacée par la résultante des forces que produiraient trois déplacements successifs suivant trois axes rectangulaires, et égaux aux projections sur ces trois axes, du déplacement considéré.

Surface d'élasticité. — Si l'on prend sur les trois axes d'élasticité et sur des rayons vecteurs menés dans tous les sens à partir d'un même point, des longueurs proportionnelles aux racines carrées des élasticités, *e*, développées par les petits déplacements parallèles à chacune de ces directions, on formera une surface que Fresnel nomme *surface d'élasticité*, et dont les rayons vecteurs représenteront la vitesse v de propagation des vibrations qui leur sont parallèles, à cause de la relation $v = \sqrt{e : d}$ (2216). Si nous désignons par v un rayon vecteur, par X, Y, Z les angles qu'il fait avec les trois axes d'élasticité, et par a, b, c les longueurs des trois demi-axes, qui mesurent ce qu'on nomme les *vitesses principales* de propagation, la surface d'élasticité, en coordonnées polaires, sera représentée par l'équation

$$v^2 = a^2 \cos^2 X + b^2 \cos^2 Y + c^2 \cos^2 Z\,;$$

et, en la rapportant aux axes d'élasticité, par l'équation du 4ᵉ degré

$$(x^2 + y^2 + z^2)^2 = a^2 x^2 + b^2 y^2 + c^2 z^2.$$

2401. Propagation du déplacement d'une particule. — Il faut remarquer dans la construction de la surface d'élasticité, que le carré du rayon vecteur ne représente pas la résultante entière des forces qui agissent sur la particule déplacée, suivant sa direction, mais seulement la composante dirigée suivant le rayon vecteur. Pour bien concevoir ce point, considérons une particule O (*fig.* 1719) ébranlée isolément, et soient Ox, Oy, Oz les trois axes d'élasticité, perpendiculairement auxquels les vitesses principales de propagation des vibrations qui leur sont parallèles, sont a, b, c. Les forces d'élasticité développées par un même déplacement d dirigé successivement suivant ces axes, seront kda^2, kdb^2, kdc^2; puisque le carré de la vitesse est proportionnel à l'élasticité (2216), et que la force élastique développée est proportionnelle au déplacement d, en le supposant très petit par rapport aux distances des particules d'éther.

Supposons maintenant que le déplacement d s'effectue suivant une droite OD faisant les angles α, β, γ avec les axes. D'après le deuxième principe (2400), la force d'élasticité développée sera la résultante de trois forces que feraient naître les déplacements $d \cos \alpha$, $d \cos \beta$, $d \cos \gamma$, dirigés suivant les axes,

forces qui sont égales à $kda^2 \cos \alpha$, $kdb^2 \cos \beta$, $kdc^2 \cos \gamma$; k étant une constante, et dont la résultante R est égale, d'après la règle du parallélipipède des forces, à

$$R = kd \sqrt{a^4 \cos^2 \alpha + b^4 \cos^2 \beta + c^4 \cos^2 \gamma} = kdN^2,$$

en représentant le radical par N^2. — Si α', β', γ' sont les angles que fait la direction de cette force avec les trois axes. Ces angles seront donnés par les relations

$$\cos \alpha' = \frac{kda^2 \cos \alpha}{R}, \qquad \cos \beta' = \frac{kdb^2 \cos \beta}{R}, \qquad \cos \gamma' = \frac{kdc^2 \cos \gamma}{R},$$

valeurs qui diffèrent de $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$, si ce n'est quand la substance est homogène, auquel cas on a $a = b = c$, et $R = kda^2$. La direction OR de la résultante R est donc, en général, différente de celle, OD, du déplacement, et l'angle $DOR = \omega$ est donné par la relation

$$\cos \omega = \frac{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \cos^2 \beta + c^2 \cos \gamma}{N^2}.$$

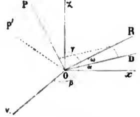


Fig. 1719.

La force d'élasticité R agit dans la même direction que le déplacement, quand celui-ci s'accomplit suivant un des axes; car, si l'on fait, par exemple, $\alpha = 0$, ce qui exige que l'on ait $\beta = \gamma = 90°$, on trouve $\cos \omega = 1$, d'où $\omega = 0$; ce qui peut se voir aussi au moyen des valeurs de $\cos \alpha'$, $\cos \beta'$, $\cos \gamma'$, qui donnent alors $\alpha' = 0$; et $\beta' = \gamma' = 90°$.

Changement de direction des déplacements pendant la propagation. — Décomposons la résultante d'élasticité R, dont la direction est OR (*fig.* 1719), en deux forces, l'une $R' = R \cos \omega$ dirigée suivant OD, l'autre $R'' = R \sin \omega$, suivant OP perpendiculaire à OD. Le déplacement de la molécule O suivant OD se propagera dans tous les sens autour du point O, mais la direction du déplacement ne sera pas, en général, conservée sur la ligne de propagation. Il faut excepter la direction OP, dans laquelle les déplacements se feront toujours parallèlement à OD; car, la composante de l'élasticité suivant OP, étant perpendiculaire à la direction OD du déplacement, n'aura aucune influence pour en modifier, soit la direction, soit la vitesse. Cette composante R'' ne pourrait que rapprocher les molécules d'éther les unes des autres dans le sens OP, et engendrer ainsi des condensations, qui sont incapables de produire des effets lumineux. La vitesse de propagation dans cette direction privilégiée sera donnée par la relation $R' = R \cos \omega = kdu^2$, d'où l'on tire, en remplaçant R et $\cos \omega$ par leur valeur,

$$u^2 = a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \cos^2 \beta + c^2 \cos^2 \gamma.$$

Mais, suivant une direction, telle que OP′, différente de OP, les vibrations se propagent en quittant la direction parallèle au premier déplacement. En effet, on peut décomposer la composante R″ en deux autres, l'une R″ cos ρ suivant OP, qui ne peut modifier la direction des vibrations; l'autre R″ sin ρ perpendiculaire à OP, et qui agit constamment pour modifier la direction du déplacement, en se combinant avec la composante suivant OD.

2402. Propagation d'une onde plane polarisée. — Considérons maintenant, non plus une seule particule vibrante, mais une onde plane *polarisée*, c'est-à-dire dans laquelle les particules d'éther oscillent avec la même force et dans des directions parallèles. Fresnel fait voir que les élasticités, mises en jeu par tous ces déplacements, suivent les mêmes lois que lorsqu'il ne s'agit que d'une seule particule :

1° Si le plan de l'onde est perpendiculaire à l'axe *ox* (*fig.* 1719), et si les mouvements vibratoires sont parallèles à un autre axe, O*z*, par exemple, ces mouvements se propageront suivant O*x*, en restant constamment parallèles à O*z*, et avec la vitesse *c* qui leur correspond. Cela revient à dire qu'une onde plane perpendiculaire à l'un des axes d'élasticité et polarisée parallèlement à l'un des deux autres, se propage sans se diviser et sans que son plan de polarisation change.

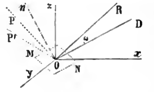


Fig. 1720.

2° Si les déplacements des particules dans le plan *zy* ne se font pas parallèlement à l'un des axes O*z* ou O*y*, et s'ils font un angle δ avec l'axe O*z*, le mouvement *d* sera l'effet résultant de deux mouvements partiels, l'un *d* cos δ dirigé suivant O*z* ; l'autre *d* sin δ, suivant O*y*, et il y aura ainsi deux systèmes d'ondes polarisées à angle droit et se propageant dans la même direction O*x*.

3° Considérons maintenant le cas où l'onde plane MN passant par O (*fig.* 1720) est dirigée d'une manière quelconque par rapport aux axes d'élasticité. Soit O*n* la direction de la propagation, normale au plan de l'onde, et par conséquent à la direction OD des déplacements. Dans ce cas, l'élasticité développée par le déplacement d'une particule n'est plus dirigée dans le sens du déplacement, qui se propage alors, parallèlement à O*n*, en se détournant de plus en plus de la direction qu'il avait d'abord. Si cependant la force élastique développée R était située dans le plan *n*OD, les vibrations conserveraient leur direction pendant la propagation ; car la composante R cos ω aurait seule de l'influence, l'autre, R sin ω, étant perpendiculaire à la direction des vibrations. Or, Fresnel a démontré qu'il existe toujours dans le plan de l'onde, quelle qu'en soit la position, deux directions du mouvement de l'éther pour lesquelles la force R se trouve dans le plan *n*OD ; et, par conséquent, telles que les déplacements se propagent en conservant des directions parallèles. Ces deux directions sont perpendiculaires entre elles. Pour les trouver, on

considère l'intersection de la surface d'élasticité avec le plan de l'onde, et l'on construit le plus grand et le plus petit des rayons vecteurs contenus dans cette intersection. Les vitesses de propagation des déplacements dirigés suivant ces rayons, sont proportionnelles à leurs longueurs ; elles doivent donc varier avec la position du plan de l'onde. Si l'on désigne par m, n, p les angles que fait la normale On avec les trois axes, ces deux vitesses sont données par l'équation

$$(v^2-b^2)\,(v^2-c^2)\cos^2 m+(v^2-c^2)\,(v^2-a^2)\cos^2 n+(v^2-b^2)\,(v^2-a^2)\cos^2 p=0$$

Si le déplacement d n'est pas dirigé parallèlement au plus grand ou au plus petit rayon vecteur, et s'il fait un angle i avec l'un des deux, on peut le regarder comme l'effet résultant de deux déplacements, $d\cos i$ et $d\sin i$ dirigés suivant ces rayons vecteurs. Ces deux déplacements composants se propagent avec des vitesses proportionnelles aux rayons vecteurs, auxquels ils restent constamment parallèles ; ils donnent les directions des vibrations de l'onde ordinaire et extraordinaire. On voit donc qu'une onde plane en O se décompose en deux autres polarisées à angle droit, et marchant avec des vitesses différentes dans la direction On. Si le point O appartient à la surface du milieu, de telle sorte que la vitesse change au point d'incidence, cette vitesse prenant des valeurs différentes pour les deux mouvements composants, les surfaces planes des ondes qui leur correspondent seront inclinées l'une à l'autre, et les directions de la propagation dans le milieu seront différentes, comme cela résulte de l'explication de la réfraction (2230).

2403. Cas d'une onde plane naturelle. — Si tous les mouvements, au lieu de s'accomplir dans le plan de l'onde suivant une même direction, se succèdent dans des directions qui varient à chaque instant, chacun des mouvements élémentaires pourra de même se décomposer en deux autres suivant les rayons vecteurs maximum et minimum, et nous obtiendrons encore la décomposition de l'onde en deux autres polarisées dans des plans perpendiculaires au plus grand et au plus petit rayon vecteur.

2404. Axes optiques des cristaux. — La discussion de l'équation de la surface d'élasticité montre qu'il existe toujours deux plans diamétraux qui coupent cette surface suivant une circonférence. Ces deux plans ont pour intersection l'axe d'élasticité moyen, et sont placés symétriquement par rapport aux deux autres axes. Si b est l'axe moyen, et a le plus grand axe, ces plans forment avec les axes a et c, des angles dont la tangente est donnée par la formule $\tang \rho=\pm\sqrt{\frac{a^2-b^2}{b^2-c^2}}$.

Les ondes parallèles à ces sections circulaires ne peuvent avoir qu'une seule vitesse de propagation, puisque tous les rayons vecteurs sont égaux, et les déplacements se propagent parallèlement à leur première direction, quelle qu'elle soit. Si donc on taille dans un cristal, une face parallèle à l'une de ces sections circulaires, et qu'on y introduise normalement une onde polarisée dans un plan quelconque, elle restera parallèle à la surface d'entrée, et

n'éprouvera ni double réfraction ni changement dans la direction de son plan de polarisation. Les perpendiculaires aux sections circulaires coïncident sensiblement avec les *axes optiques* des cristaux à deux axes. L'axe moyen d'élasticité est perpendiculaire au plan de ces axes optiques, et les autres axes d'élasticité sont la ligne moyenne et la ligne supplémentaire, comme nous l'avons déjà vu (2329). Si les deux axes c et b sont égaux, on a tang $\rho = \infty$, d'où $\rho = 90°$; les deux sections circulaires se confondent donc en une seule perpendiculaire à la ligne moyenne : c'est le cas des cristaux à un axe. Il ne faudrait pas faire $a = c$; car, b étant l'axe moyen, il en résulterait que les trois axes seraient égaux, ce qui reviendrait à supposer la substance homogène; on trouverait alors tang $\rho = \frac{0}{0}$; ce qu'il était facile de prévoir.

Les valeurs des trois axes a, b, c peuvent se déduire de celles des indices de réfraction $\frac{1}{a}$, $\frac{1}{b}$ et $\frac{1}{c}$, obtenus en taillant dans un même cristal trois prismes parallèles aux trois axes, dont les directions dans le cristal peuvent être connues par des moyens que nous indiquerons plus tard. C'est ce qui a été fait par M. Rudberg sur la topaze incolore et l'aragonite, et par Biot, M. de Sénarmont,.... sur divers cristaux. On a donc pu vérifier les relations qui existent entre les directions des axes optiques et celles des axes d'élasticité.

Comme les indices de réfraction sont différents pour les diverses couleurs simples, on voit que les axes d'élasticité, et par conséquent les directions des axes optiques, ne seront pas les mêmes pour les différentes couleurs, comme MM. Herschel et Brewster l'ont remarqué dans plusieurs cristaux (2330).

2405. Surface de l'onde. — Nous avons considéré jusqu'à présent une onde plane, c'est-à-dire engendrée par des mouvements de l'éther s'accomplissant tous dans un même plan. Supposons maintenant que l'éther au point O (*fig.* 1720) soit animé *simultanément* de mouvements dans toutes les directions, comme cela aurait lieu en partie au foyer d'une lentille. Le lieu des points où arriveront tous les ébranlements après l'unité de temps, sera la surface de l'onde, dans la position où elle se trouvera au bout de ce temps. Tous les ébranlements dirigés dans un même plan donnant une onde plane, qui doit être, au bout de l'unité de temps, tangente à la surface de l'onde, on voit que celle-ci s'obtiendra en cherchant une surface tangente à toutes les ondes planes correspondantes aux différentes directions des mouvements de l'éther en O ; la position de chaque onde plane étant déterminée comme il a été dit plus haut (2402). En suivant cette marche, Fresnel a trouvé pour l'équation générale de la surface de l'onde,

$$(a^2x^2+b^2y^2+c^2z^2)(x^2+y^2+z^2)-a^2(b^2+c^2)x^2-b^2(a^2+c^2)y^2-c^2(a^2+b^2)z^2+a^2b^2c^2=0$$

dans laquelle a, b, c sont les axes d'élasticité. Cette équation est du 4ᵉ degré et représente une surface à deux nappes.

2408. Construction des rayons réfractés. — Soit *ta* (*fig.* 1721) la surface d'incidence, et *slt* le plan d'incidence. Menons par le point d'incidence I trois droites parallèles aux trois axes d'élasticité du cristal, et construisons la surface de l'onde, au moyen de son équation par rapport à ces axes, et en donnant à *a*, *b*, et *c* les valeurs déterminées comme il a été dit plus haut, en prenant la vitesse dans le vide pour unité. Si nous menons I*b* perpendiculaire à *s*I, nous aurons le plan de l'onde incidente. Cette onde se propage dans le milieu, en donnant lieu à une ou deux ondes planes, qui arrivent, aprés 1ˢ, dans une certaine position qu'il s'agit de déterminer. Ces ondes planes coupent l'onde incidente au point *t*, où elle arrive aussi aprés 1ˢ, suivant une droite située dans la face *ta*. Or, l'onde I*b*, aprés 1ˢ, vient en *t*β, et coupe la face *ta* suivant *t*α perpendiculaire au plan d'incidence ; le point *t* étant obtenu en menant perpendiculairement à la surface de l'onde I*b*, la droite *bt* dont la longueur est égale à l'unité. Les plans des ondes réfractées devant, en outre, être tangents à la surface de l'onde, on les obtiendra en menant par la droite *t*α et au-dessous de la face d'entrée *ta*, des plans tangents à la surface de l'onde[1]. Les points de contact *r*, *r'* de ces plans tangents étant supposés déterminés, il suffira de les joindre au point I pour avoir les deux rayons réfractés. On reconnaît ici la construction d'Huyghens, mais bien plus générale, puisqu'elle s'applique aux cristaux à deux axes; et même aux substances non homogènes quelconques, comme le verre comprimé, trempé, inégalement échauffé, si la surface de l'onde, qui doit être très irrégulière, pouvait être connue. On voit aussi qu'aucune des surfaces n'ayant la forme sphérique, aucun des deux rayons ne suivra les lois de Descartes. C'est ainsi que Fresnel découvrit qu'il n'y a pas, en général, de rayon ordinaire dans les cristaux à deux axes ; ce qu'il vérifia ensuite par l'expérience (2328).

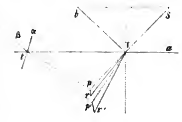


Fig. 1721.

Cas des cristaux à un axe. — Si l'on a $b = c$, le cristal est à un axe, et l'équation de la surface de l'onde se décompose en deux autres :

$$x^2 + y^2 + z^2 - b^2 = 0, \quad \text{et} \quad a^2 x^2 + b^2 (y^2 + z^2) - a^2 b^2 = 0.$$

La première représente une sphére de rayon *b*, et la seconde un ellipsoïde de révolution autour de l'axe *a*. Les rayons réfractés sont alors donnés par la construction d'Huyghens (2318). Si l'on suppose $a = b = c$, la surface de l'onde se réduit à une sphére unique, et il n'y a plus qu'un rayon réfracté.

[1] La surface de l'onde étant du quatrième degré, il y a, en général, quatre plans tangents ; mais les points de contact de deux d'entre eux se trouvant en dehors du cristal, ne peuvent convenir.

Remarques. — La surface de l'onde n'est pas, en général, normale aux rayons réfractés, et, par conséquent, les mouvements vibratoires ne sont pas exactement perpendiculaires aux rayons. C'est pourquoi nous avons dit que les vibrations sont *transversales*, et non, perpendiculaires. Il résulte aussi de là que la vitesse de transmission des deux ondes planes n'est pas la même que celle des rayons ; car les dernières sont représentées par les longueurs Ir et Ir', et les premières, par les perpendiculaires Ip, Ip' abaissées du point I sur le plan tangent à la surface de l'onde.

2407. Direction des mouvements vibratoires. — Tous les mouvements vibratoires dans chacune des surfaces d'onde sont parallèles, les deux ondes étant polarisées. On démontre par le calcul que les directions de ces mouvements aux points r et r' (*fig.* 1721) sont les projections des rayons, sur les plans tangents en ces points. On obtient ces projections en menant les perpendiculaires Ip, Ip' aux intersections tp, tp' des plans tangents avec le plan d'incidence prolongé, et joignant rp et rp'. — Cette construction n'est plus possible quand le rayon est normal à la surface de l'onde ; mais cela n'a lieu que pour des directions particulières des rayons transmis, pour lesquelles la direction des vibrations est connue d'avance.

2408. Plan de polarisation. — Les mouvements vibratoires étant obliques au rayon, on ne peut pas, en général, mener par le rayon un plan perpendiculaire à la direction de ces mouvements. Fresnel prenait, pour plan de polarisation, le plan normal à la vibration et passant par la perpendiculaire Ip (*fig.* 1721). Mais on pourrait tout aussi bien adopter le plan passant par le rayon, et perpendiculaire au plan du triangle Irp. Toute incertitude disparaîtrait, si l'on considérait, au lieu du plan de polarisation, le *plan du rayon* (2341). Du reste, les plans de polarisation, définis des deux manières, diffèrent très peu dans tous les cristaux connus. On peut donc adopter l'une ou l'autre définition. Il est à remarquer que, dans les deux cas, les plans de polarisation des deux rayons ne sont pas rigoureusement perpendiculaires l'un à l'autre, si ce n'est pour certaines directions particulières, ou quand il s'agit de cristaux à un seul axe. La définition adoptée par Fresnel conduit à énoncer la position du plan de polarisation d'une manière différente de celle de Biot (2382) ; mais les résultats obtenus de ces deux manières ne diffèrent que de quelques minutes. On peut donc regarder les expériences de Biot comme vérifiant les résultats de Fresnel, et on ne sait lequel admirer le plus, de la perfection de la théorie, ou de la sagacité et de la dextérité qu'il a fallu, pour démêler par l'expérience des lois aussi compliquées.

2409. Vitesse de propagation. — Les vitesses de la lumière suivant les rayons réfractés, sont représentées par les rayons vecteurs Ir, Ir' (*fig.* 1721). Quand on considère deux rayons suivant la même direction et provenant de rayons incidents différents, leurs vitesses sont données par la formule

$$\frac{1}{v^2}-\frac{1}{v'^2}=\left(\frac{1}{c^2}-\frac{1}{a^2}\right)\sin\alpha\sin\alpha',$$

en désignant par α et α' les angles que fait la direction commune de ces rayons avec les *axes optiques*. Cette formule exprime que la différence $\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2}$ est proportionnelle au produit des *sinus* des angles α et α'; elle avait été déduite de l'expérience par Biot et par M. Brewster, avant que la théorie n'y eût conduit Fresnel. Seulement $\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2}$ était remplacé par $v^2 - v'^2$, comme nous l'avons vu plus haut (2332), parce que, dans le système de l'émission, que l'on admettait alors, v et v' ont la même signification que $1 : v$ et $1 : v'$ dans le système des ondulations (2251). On voit que, dans le cas des cristaux à un axe, la formule s'applique aux deux rayons séparés provenant d'un même rayon incident, puisque la vitesse du rayon ordinaire reste la même dans toutes les directions.

2410. Discussion de la surface de l'onde. — Cherchons, en partant de l'équation de la surface de l'onde (2405), les particularités que présente cette surface, dans le cas général où les trois axes sont inégaux, et voyons d'abord suivant quelles courbes elle est coupée par les plans des axes d'élasticité. En faisant successivement x, y, z nuls, on trouve

Pour $x = 0$, $\quad (y^2+z^2-a^2)(b^2y^2+c^2z^2-b^2c^2)=0$

Pour $y = 0$, $\quad (z^2+x^2-b^2)(c^2z^2+a^2x^2-c^2a^2)=0$

Pour $z = 0$, $\quad (x^2+y^2-c^2)(a^2x^2+b^2y^2-a^2b^2)=0$

On voit que chacune des intersections est l'ensemble d'une *circonférence* et d'une *ellipse*. En supposant toujours $a>b$, et $b>c$, nous voyons que, dans le plan yOz, la circonférence est extérieure à l'ellipse, puisque son rayon a est plus grand que le grand axe b de celle-ci. Dans le plan, xOy, c'est l'ellipse qui enveloppe la circonférence. Mais dans le plan xOz, c'est-à-dire dans le plan principal perpendiculaire à l'axe moyen, le rayon b de la circonférence ayant une valeur intermédiaire entre celle des axes a et c de l'ellipse, les deux courbes se coupent. C'est ce que nous avons représenté précédemment dans la *figure* 1702 (2332), seulement l'axe moyen était dirigé suivant Oz, au lieu de l'être suivant Oy, comme nous venons de le supposer. La forme circulaire de l'intersection de l'une des nappes par chacun des plans principaux, montre que l'un des rayons réfractés aura une vitesse constante dans ce plan, quelle que soit sa direction, et, par conséquent, que ce rayon suivra les lois de Descartes, comme nous l'avons déjà dit (2331). On trouvera ce rayon, ainsi que le rayon extraordinaire, au moyen de la construction d'Huyghens, en menant des *tangentes* à la circonférence et à l'ellipse d'intersection ; car il est facile de voir que le plan tangent à la surface de l'onde en un point de l'ellipse, est perpendiculaire au plan principal ; puisque, l'équation de la surface de l'onde ne contenant que les carrés des coordonnées, cette surface est partagée en deux parties symétriques, par chacun des plans principaux.

Si la surface d'incidence étant perpendiculaire à l'un des axes, le rayon incident entrait normalement, il est facile de voir que les plans tangents servant à construire les rayons réfractés seraient parallèles entre eux, et que leurs points de contact se trouveraient sur la normale à la face d'incidence. Les deux rayons réfractés suivraient donc la même direction, mais avec des vitesses différentes. Si en même temps le rayon était polarisé dans un plan perpendiculaire à l'un des axes parallèles à la face d'incidence, l'un des rayons transmis disparaîtrait, et toute la lumière serait rassemblée dans l'autre, dont le plan de polarisation coïnciderait avec celui du rayon incident.

Axes optiques. — Les vitesses des deux rayons sont égales dans les directions des rayons vecteurs O*a*, O*a'* (*fig.* 1722), qui joignent, dans le plan principal perpendiculaire à l'axe moyen, les intersections *a*, *a*, *a'*, *a'* des courbes elliptique et circulaire. Ces directions sont les *axes optiques*; ils font avec l'axe de plus grande élasticité, des angles donnés par la formule $\tang \rho = \frac{a}{c}\sqrt{\frac{b^2-c^2}{a^2-b^2}}$. Il faut remarquer que ces axes optiques ne coïncident pas exactement avec les perpendiculaires aux sections circulaires de la surface d'élasticité (2404).

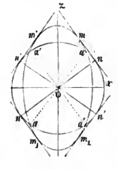


Fig. 1722.

2411. Réfraction conique intérieure. — Considérons encore les courbes d'intersection des deux nappes de la surface de l'onde avec le plan principal perpendiculaire à l'axe moyen (*fig.* 1722). Ces deux courbes se coupent en quatre points, et on peut leur mener quatre tangentes communes *mn*, *m'n'*, nm_1, $n'm_1$. Ces tangentes sont parallèles deux à deux, aux sections circulaires de la surface d'élasticité (2402). Or, M. Hamilton a reconnu, en discutant l'équation de la surface de l'onde, qu'un plan perpendiculaire au plan principal et passant par une quelconque de ces tangentes, est tangent aux deux nappes, non seulement aux points *m* et *n*, mais encore à tous les points d'une courbe sensiblement circulaire, dont le plan est parallèle à l'axe moyen d'élasticité, et dont les divers points sont inégalement distants du centre de l'onde O. Si donc on taille dans un cristal une plaque dont les faces soient parallèles à deux de ces plans tangents, un rayon entrant normalement donnera une infinité de rayons réfractés situés sur la surface d'un cône oblique passant par la courbe de contact, *mn* parallèle à la face d'incidence. Le résultat serait le même, si, la face d'entrée étant oblique au plan *mn*, l'incidence était telle que le rayon réfracté entrât parallèlement à l'axe optique O*a*.

Tube lumineux émergent. — Chaque rayon réfracté donnant à l'émergence un rayon parallèle au rayon incident, on voit que le faisceau émergent formera un cylindre creux parallèle au rayon incident. Cette conséquence curieuse de la théorie, qui avait échappé à Fresnel, a été vérifiée par M. Lloyd,

sur une plaque d'aragonite taillée perpendiculairement à la ligne moyenne. Un pinceau *très mince* de rayons solaires passant par deux petits trous et tombant sur la plaque, donnait deux images ; mais en inclinant peu à peu la plaque, on cherchait l'incidence pour laquelle le faisceau réfracté était parallèle à l'un des axes optiques, et alors on distinguait avec une loupe, dans le faisceau émergent, un anneau brillant dont le diamètre, indépendant de la distance, était d'autant plus grand que le cristal était plus épais. Ce phénomène avait échappé aux observateurs avant que la théorie ne l'eût signalé, parce que les plaques employées étant trop minces, le tube lumineux avait un diamètre à peine supérieur à celui du faisceau incident ; de plus, celui-ci était habituellement trop gros pour que le phénomène fût distinct.

Direction des mouvements vibratoires. — Si nous menons la normale O*n* au plan *mn* (*fig.* 1722), et si nous joignons son pied au point où un rayon quelconque rencontre la courbe de contact, nous aurons la direction des mouvements vibratoires dans ce rayon (2408). Il résulte de là, que les plans de polarisation de deux rayons diamétralement opposés sont perpendiculaires l'un à l'autre ; car *mrr'* étant la courbe de contact, et *m* le pied de la normale O*n* (*fig.* 1722), les deux rayons aboutissant aux extrémités d'un même diamètre *rr'* (*fig.* 1723), auront pour projection sur le plan de l'onde plane, les droites *mr*, *mr'*, qui sont perpendiculaires l'une à l'autre. Si l'on considère deux rayons quelconques aboutissant en *r* et *r''*, on voit que l'angle des directions *mr*, *mr''* de leurs mouvements vibratoires, est la moitié de l'angle *ror''* que font entre eux des plans menés par ces rayons, et par l'axe du cône oblique dont la base est *mr'n*.

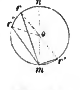


Fig. 1723.

Axes de réfraction conique. — Les deux perpendiculaires *n*O*n*, *n'*O*n'* (*fig.* 1722) aux plans tangents *mn*, *m'n'*, se nomment les *axes de réfraction conique*. On voit qu'ils sont situés dans le plan perpendiculaire à l'axe moyen, comme les axes optiques ; mais ils ne se confondent pas avec ces derniers. L'angle qu'ils forment avec l'axe de plus grande élasticité est donné par la formule $\tan \rho' = \sqrt{\frac{b^2-c^2}{a^2-b^2}}$; tandis que, dans la valeur de $\tan \rho$ pour les axes optiques O*a*, O*a'*, le radical est multiplié par $a : c$ (2404). Mais comme, dans tous les cristaux connus, $a : c$ diffère peu de l'unité, ρ' diffère peu de ρ ; et les axes optiques et ceux de réfraction conique coïncident sensiblement. Pour la chaux sulfatée anhydre, dont la double réfraction est des plus énergiques, on a $c : a = 0{,}9725$; et pour la topaze, 0,9939 ; nombres peu inférieurs à l'unité.

2412. Réfraction conique à l'émergence. — La découverte par la théorie, et la vérification expérimentale du phénomène singulier de la réfraction conique, ont apporté à la théorie de la double réfraction, et en particulier à l'hypothèse des vibrations transversales, une confirmation d'autant plus remar-

quable qu'elle était plus inattendue. M. Hamilton a découvert une autre particularité singulière qui se présente aux extrémités des axes optiques, et que M. Lloyd a aussi vérifiée par l'expérience :

Nous avons défini les axes optiques des cristaux à deux axes, des directions suivant lesquelles les rayons réfractés ne se bifurquent pas ; nous allons voir que cette définition ne leur convient nullement ; mais comme ils se confondent sensiblement avec les axes de réfraction conique, suivant lesquels les rayons ne se bifurquent pas, les premiers observateurs ont dû s'y tromper. Fresnel, guidé par la théorie, avait remarqué que, dans le plan perpendiculaire à l'axe d'élasticité moyen, on peut mener deux tangentes aux extrémités *a*, *a*, *a'*, *a'* (*fig.* 1722) des axes optiques, et plus tard M. Hamilton a démontré que ces points sont des *ombilics*, c'est-à-dire qu'ils se trouvent au fond d'une cavité conoïde très évasée en forme de pavillon de cor, de manière qu'il y a en ces points une infinité de plans tangents, dont les intersections deux à deux forment un cône oblique. Il résulte d'abord de là, que des rayons incidents situés sur un certain cône, pourront se réunir en un seul rayon réfracté suivant un des axes optiques. En effet, soit A*It* (*fig.* 1724) une face taillée dans un cristal, à peu près perpendiculairement à l'un des axes optiques I*a*, et A*at* le plan perpendiculaire à l'axe moyen, sur lequel sont tracées les intersections de la surface de l'onde avec ce plan. Menons la tangente *at* au point *a* ; nous pourrons en faisant, en sens inverse, la construction d'Huyghens (2318), trouver en partant du point *a*, la direction d'un rayon incident *s*I donnant le rayon réfracté I*a*. La tangente *at'* fera connaître un second rayon incident *s'*I se réfractant aussi suivant I*a*. On pourra faire une construction analogue dans tous les plans passant par I*a* : on ménera un plan tangent au point *a*, perpendiculairement au plan considéré, puis du point I, une perpendiculaire, dans la face d'incidence, à l'intersection du plan tangent avec cette face ; ce qui donnera le plan d'incidence, dans lequel on achévera la construction à la manière ordinaire. On obtiendra ainsi un cône oblique de rayons incidents donnant des rayons réfractés marchant tous suivant I*a*. Si le cristal est terminé par une seconde face parallèle à A*t*, chaque rayon incident donnant un rayon émergent parallèle à sa direction, on voit qu'il se formera en E un cône creux de rayons, ayant ses arêtes respectivement parallèles à celles du cône incident *s*I*s'*. Le plan de polarisation de chacun de ces rayons s'obtiendra en joignant au point *a*, le pied de la perpendiculaire au plan tangent qui lui correspond, ce qui donnera la direction du mouvement vibratoire auquel le plan de polarisation est normal.

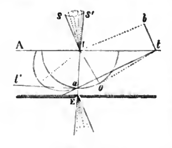


Fig. 1724.

M. Lloyd a vérifié tous ces résultats par l'expérience. Le faisceau conique incident *s*I*s'* était fourni par les rayons solaires ayant traversé une lentille dont

l'axe était normal à la face *At* d'une plaque d'aragonite taillée perpendiculairement à l'un des axes optiques. Le foyer étant en I, le cristal était traversé par un faisceau normal aboutissant en E à une petite ouverture pratiquée dans un écran appliqué sur la seconde face de la plaque. On observait à l'émergence, soit à travers une loupe, soit sur un écran, un anneau lumineux, dont le diamètre augmentait avec la distance au point E.

M. Soleil a construit un petit appareil destiné à répéter cette expérience. La lentille, la plaque cristallisée et la loupe sont fixées à une régle articulée sur un pied. Le cristal peut se mouvoir autour d'un axe situé dans son plan. Il faut d'assez longs tâtonnements pour ajuster l'appareil, parce qu'il est impossible d'obtenir une plaque exactement perpendiculaire à l'un des axes.

Si l'on observe le cône émergent, à travers un prisme de Nicol, l'anneau lumineux paraît interrompu dans la section principale de ce prisme ; ce qui montre que les vibrations se font bien dans cette section principale, et par conséquent dans des plans passant par l'axe du cône.

2413. Définition des axes optiques. — Il est à remarquer que chaque rayon incident, tel que *sI* (*fig.* 1724) donne, indépendamment du rayon réfracté suivant l'axe *Ia*, un autre rayon, tel que *Io*, que l'on obtient, en général, en menant par le point *t*, et par une droite menée par ce point perpendiculairement au plan d'incidence, un second plan tangent à la surface de l'onde. Par conséquent, les rayons qui suivent les axes sont généralement accompagnés d'un *second rayon*, résultant d'une bifurcation qui a lieu au point d'incidence. La définition que nous avons donnée des axes optiques ne peut donc plus être conservée. Leur propriété caractéristique consiste en ce qu'ils peuvent être parcourus avec la même vitesse par des rayons polarisés dans des plans quelconques passant par leur direction, et c'est cette propriété qui doit leur servir de définition.

CHAPITRE XI.

POLARISATION CHROMATIQUE.

§ 1 — RAYONS PARALLÈLES.

I. Couleurs produites par les lames cristallisées.

2414. Découverte de la polarisation chromatique. — Arago, ayant regardé, à travers un spath d'Islande, une lame de mica qui se projetait sur un ciel serein, aperçut deux images de la lame, colorées de nuances différentes. Ayant aussitôt attribué ce résultat à la polarisation des rayons atmosphériques,

il entreprit de nombreuses expériences sur des rayons polarisés directement, et découvrit une série de faits remarquables, qu'il publia en 1811. M. Brewster les découvrait de son côté, à Edimbourg; mais ses expériences ne furent connues que plus tard en France. Aujourd'hui, l'étude de ces phénomènes forme une branche de l'optique, désignée sous le nom de *polarisation chromatique* ou *couleurs de la lumière polarisée*. MM. Biot, Young, Brewster, Mitscherlich..., ont le plus contribué à en trouver les lois, et Fresnel en a donné la théorie complète dans le système des ondulations. Nous allons d'abord indiquer comment se font les expériences.

2415. Méthodes d'observation. — Les résultats dépendant de l'angle de la lame cristallisée avec les rayons incidents, et de celui que fait sa section principale avec le plan de polarisation de ces rayons, il faut pouvoir faire varier ces angles de quantités angulaires connues. L'appareil de Biot (*fig.* 1706) peut remplir cette condition. La lame de mica, ou de toute autre substance bi-réfringente, est fixée au centre d'un anneau *n*, pouvant tourner sur lui-même dans un autre anneau. Ce dernier, mobile autour d'un axe horizontal, peut s'incliner plus ou moins par rapport à l'axe de l'instrument. Des cercles divisés indiquent les angles de rotation de la lame dans ces deux mouvements.

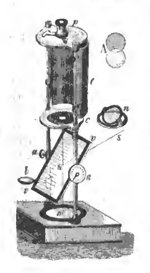


Fig. 1725.

Appareil de Norremberg. — Cet appareil (*fig.* 1725) se prête facilement à toutes les expériences. La lumière incidente *sn* est polarisée par réflexion sur une glace sans tain *vv*, qui peut s'incliner plus ou moins en tournant autour de l'axe *aa*, et qui la renvoie de haut en bas sur une glace étamée *o*. Là, les rayons sont réfléchis verticalement de bas en haut, traversent la lame *vv*, et passent au milieu d'un plateau *cc* destiné à recevoir la lame cristallisée. Cette lame est posée sur une plaque circulaire pouvant tourner sur elle-même dans un anneau gradué, dont le zéro se trouve dans le plan de polarisation des rayons. On peut substituer à cette plaque, un anneau *n* soutenant un disque de verre qui peut s'incliner plus ou moins autour d'un axe horizontal, et sur lequel on pose la lame. Le polariscope placé en *p*, peut tourner sur lui-même de quantités mesurées par un cercle gradué et un vernier. *e* est un écran qui empêche la lumière directe de frapper le plateau *cc*, et *l* une lentille dont nous verrons plus tard l'usage.

Quand on ne veut qu'observer les phénomènes sans en mesurer les conditions, on peut simplement regarder, à travers le polariscope et la lame cristallisée tenus à la main, la lumière des nues réfléchie sur un miroir en verre noir, ou simplement sur la surface d'une table en marbre ou en bois

verni. Si la lame est fixée à un chevalet oblique posé sur la table, et le polariscope à un pied vertical, on a la disposition générale de l'appareil de M. Lebaillif. On peut enfin se servir d'une lunette de Rochon (2325) et viser, à travers la lame de cristal, la lumière réfléchie par un miroir de verre; on verra deux images colorées.

Appareil à projection. — Les images colorées peuvent être projetées sur un écran, au moyen d'un appareil imaginé par M. Soleil, et qui ressemble beaucoup au microscope solaire (1999). VV (*fig.* 1726) est un miroir en verre noir à double mouvement, sur lequel les rayons solaires se polarisent par réflexion. La lame cristallisée est fixée à un diaphragme que l'on engage dans la coulisse *ab*, où elle est maintenue par une plaque trouée à ressorts *nn*; les rayons modifiés en la traversant, sont rendus convergents par une lentille L, et vont faire en *cc* une image circulaire, dont une seconde lentille *l* placée à une

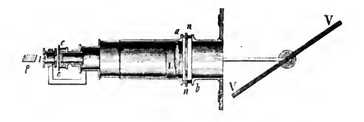


Fig. 1726.

distance un peu supérieure à son propre foyer principal, donne une nouvelle image sur un écran placé à une certaine distance. Un polariscope placé en *p* colore l'image, en la doublant s'il est bi-réfringent. — Cet appareil peut être adapté à la lampe *photo-électrique* (2000). La lumière est alors polarisée, au moyen d'une pile de glace, d'un miroir de verre, ou d'un gros prisme de Nicol.

2416. DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES. — Si l'on reçoit un faisceau polarisé, dans un polariscope orienté de manière à éteindre ce faisceau, on voit, en général, la lumière reparaître quand on place avant le polariscope une lame taillée dans un cristal bi-réfringent. On exprime quelquefois ce résultat en disant que le cristal *dépolarise* le faisceau. Mais la lumière qui sort de la lame n'est pas de la lumière naturelle; car, si cette lame a une épaisseur convenable, le faisceau est coloré. Nous verrons plus tard que ce n'est pas non plus de la lumière polarisée ordinaire. C'est avec un polariscope bi-réfringent que les phénomènes s'observent le plus complètement, parce qu'on peut comparer deux images se formant dans des conditions différentes. Supposons donc qu'on fasse usage d'un prisme bi-réfringent achromatique, et désignons par α et β les angles que font les sections principales de la lame et du prisme avec le plan

de polarisation des rayons incidents. Supposons enfin que la lame soit taillée parallélement à son axe, et qu'elle soit perpendiculaire aux rayons.

1° Quand la section principale du polariscope est parallèle au plan de polarisation des rayons incidents, c'est-à-dire quand on a $\beta = 0$, on voit, en général, deux images de l'ouverture du diaphragme qui limite le faisceau incident; et, si la lame est suffisamment mince, ces images présentent des couleurs qui dépendent de son épaisseur. Ces couleurs sont complémentaires; car, si les images sont assez grandes pour empiéter l'une sur l'autre, A (*fig.* 1725), la partie commune est toujours blanche. Les couleurs ont leur maximum d'éclat quand la section principale de la lame forme un angle de 45° avec celle du prisme. Si alors on fait tourner la lame, les couleurs pâlissent *sans changer de nuance*, jusqu'à ce que la section principale de la lame coïncide avec celle du prisme, alors il n'y a plus que l'image ordinaire; ou lui soit perpendiculaire, alors on ne distingue plus que l'image extraordinaire. L'image unique est blanche, et si l'on dépasse la position pour laquelle elle se montre, les deux couleurs changent d'image jusqu'à une nouvelle extinction de l'une d'elles. Ces phénomènes fournissent un moyen de trouver la section principale de la lame.

2° Quand la section principale du prisme est perpendiculaire au plan de polarisation, on observe des phénomènes semblables; seulement, la couleur de l'image ordinaire passe à l'image extraordinaire, et la première image disparaît, dans la position de la lame qui faisait disparaître la seconde et *vice versâ*.

3° Supposons que, la lame étant fixe, on fasse tourner le prisme, on observera des résultats dont la plupart peuvent être prévus par ce qui précède. Quand la section principale du prisme sera parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame, les deux images seront blanches. L'une d'elles disparaîtra, si en même temps l'on a $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90°$. Si $\alpha = 45°$, les deux images blanches seront égales et auront leur maximum d'intensité. Si le prisme dépasse l'une des positions qui donnent les images blanches, les couleurs reparaîtront, mais en changeant d'image.

4° Quand on a $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90°$, les deux images sont blanches, quel que soit β. Elles sont égales pour $\beta = 45°$, et disparaissent, comme on l'a vu plus haut, l'une pour $\beta = 0$, l'autre pour $\beta = 90°$.

Si, au lieu d'un prisme bi-réfringent, on emploie un polariscope ne donnant qu'une image, cette image se comporte comme l'image ordinaire, ou comme l'image extraordinaire, suivant l'espèce de polariscope employé.

Si l'on se sert d'une pile de glaces, on peut observer l'image transmise, ou celle qui est réfléchie sur la première lame, et l'on reconnaît que les couleurs de ces images sont complémentaires; ce qu'il était facile de prévoir, la réflexion et la réfraction éteignant la lumière polarisée dans des azimuts perpendiculaires l'un à l'autre.

2417. Influence de l'épaisseur de la lame. — Tout restant dans le

même état, si l'on fait varier l'épaisseur de la lame, les couleurs des images changent, et Biot a reconnu qu'elles passent par des nuances qui suivent, relativement aux épaisseurs, les mêmes lois que les couleurs des lames minces. Chacune des couleurs peut donc être du premier, du second, du troisième,... ordre, et si la lumière est simple, on observe des alternatives de lumière et d'obscurité. Mais, ici, les épaisseurs, qui varient avec la nature des lames cristallisées, n'ont plus besoin d'être aussi petites. D'après les expériences de Biot, si l'on prend pour unité, l'épaisseur d'une lame mince d'air, celle qui donnerait la même couleur serait, avec le mica de Sibérie, 440; avec la chaux sulfatée et le cristal de roche, 230; avec le spath d'Islande, 13. Quand, dans l'appareil de Norremberg (*fig.* 1725), on place la lame sur la glace *o*, on obtient la couleur qui correspond à une épaisseur double, parce que la lumière doit traverser deux fois cette lame.

Les changements de couleur avec les épaisseurs, peuvent servir à produire divers effets curieux : on colle sur une plaque de verre, une lame de sulfate de chaux dans laquelle on creuse une cavité sphérique à très grand rayon. On voit alors, dans l'appareil de Norremberg, des anneaux colorés qui suivent les mêmes lois que ceux qui se voient entre deux lentilles. Si la lame de sulfate de chaux est taillée en prisme à angle très aigu, les couleurs forment des franges parallèles à l'arête du sommet. On peut encore former, en creusant plus ou moins la lame de sulfate de chaux, des dessins de fleurs, de papillons, etc., dont les différentes parties présentent des couleurs vives et variées, suivant l'épaisseur qu'on leur a laissée. Si l'on remplit les cavités d'un baume de même réfrangibilité que le sulfate, les dessins sont invisibles dans la lumière naturelle. Des lames de mica de différentes épaisseurs collées les unes à côté des autres, imitent des vitraux peints, etc.

Limite d'épaisseur. — On n'obtient d'images colorées qu'autant que l'épaisseur n'est ni trop grande ni trop faible. Les limites sont, pour le sulfate de chaux, $0^{mm},423$ et $1^{mm},269$. Une lame de mica doit avoir moins de $0^{mm},085$. Ces deux substances se prêtent donc facilement aux expériences. Mais le spath d'Islande ne devrait pas avoir plus de $0^{mm},025$.

Lames inclinées. — Nous avons supposé la lame perpendiculaire aux rayons incidents. Si on l'incline peu à peu, les couleurs changent, tantôt comme si l'épaisseur augmentait, tantôt comme si elle diminuait, suivant le sens de l'inclinaison, comme la théorie nous l'indiquera (2425).

Teinte sensible. — Parmi les couleurs, il en est une qui est nommée *teinte sensible*, parce que une variation de quelques degrés dans l'inclinaison, suffit pour qu'on reconnaisse un changement de nuance. Cette teinte est le *violet-bleuâtre*; d'après Biot, elle correspond à une lame d'air de 533,4 millioniémes de millimètre d'épaisseur. Une lame de mica traversée normalement par des rayons polarisés, donne la teinte sensible, quand son épaisseur est $0^{mm},248$; et des lames de gypse et de quartz, quand leur épaisseur

est $0^{mm},130$, et $0^{mm},123$. Il y a une seconde teinte sensible, de couleur violette, mais moins sensible que la première.

2418. Duplication des lames. — On peut obtenir des couleurs avec des lames épaisses, en en superposant deux de même espèce, de manière que leurs sections principales soient perpendiculaires. Alors l'effet est celui d'une lame unique ayant pour épaisseur la différence $e - e'$ des épaisseurs des lames. Si les sections principales étaient parallèles, l'effet serait celui d'une lame d'épaisseur $e + e'$. Si les lames sont de nature différente et *de même signe*, il faudra encore employer la *duplication croisée*, pour obtenir des couleurs. Si, au contraire, l'une appartient à un cristal positif, et l'autre à un cristal négatif, il faudra employer la *duplication parallèle*.

Ces lois donnent un moyen facile de reconnaître le signe d'un cristal : on y taille une lame épaisse parallèle à l'axe, qu'on pose sur une lame de spath d'Islande, et l'on voit si les couleurs apparaissent dans la duplication croisée, ou dans la duplication parallèle. Dans le premier cas, le cristal est le même signe que le spath, et dans le second, de signe contraire.

Fresnel a tiré parti de la duplication, pour étudier l'influence de la chaleur sur le sulfate de chaux (2333) : il croisa deux lames de cette substance ayant des épaisseurs trop inégales pour donner des couleurs, il chauffa celle de dessous, et il vit les couleurs apparaître et se succéder, dans le même ordre que si la lame échauffée diminuait peu à peu d'épaisseur.

2419. DE L'EXPLICATION DE LA POLARISATION COLORÉE. — Aussitôt après la découverte de la polarisation chromatique, Biot chercha à l'expliquer, dans le système de l'émission, au moyen de l'hypothèse de la *polarisation mobile*, dont il a suivi toutes les conséquences avec une rare sagacité [1]. Cette hypothèse consiste à admettre que les particules de lumière simple, dont les pôles sont orientés de la même manière dans le rayon polarisé incident, pénètrent d'abord dans la lame cristallisée, jusqu'à une certaine profondeur e, en conservant cette orientation, puis se mettent à osciller de part et d'autre de la section principale, de manière à accomplir une oscillation entière pendant le parcours d'un espace égal à $2e$. Si donc l'épaisseur de la lame est e, la lumière se comporte comme si cette lame était homogène; si cette épaisseur est $2e$, le plan de polarisation à l'émergence sera dévié d'une quantité égale à la demi-amplitude des oscillations des particules; si l'épaisseur devient $3e$, la déviation sera nulle. De là les différences d'intensité suivant l'épaisseur, quand on reçoit les rayons simples sur un analyseur fixe. Les valeurs de e sont différentes pour les diverses couleurs simples; d'où résulte la coloration de la lumière blanche, l'intensité de chacun des rayons simples étant modifiée d'une manière différente. Cette théorie n'explique que difficilement un grand nombre de phénomènes, et se trouve en défaut dans plusieurs cas importants.

Young, ayant remarqué que les deux faisceaux polarisés possèdent, en

[1] *Traité de physique*, etc., par Biot, t. IV, p. 347.

sortant de la lame cristallisée, les mêmes différences de marche que les rayons réfléchis à la première et à la seconde surface des lames minces donnant la nuance du même ordre, chercha à rattacher les phénomènes de la polarisation chromatique au principe des interférences. Mais il laissa cette explication à l'état d'ébauche. Fresnel, adoptant le point de départ d'Young, parvint à retrouver toutes les circonstances des phénomènes, et en donna ainsi une théorie détaillée des plus satisfaisantes.

2420. Théorie de Frésnel[1]. — Voici d'abord le principe de cette théorie : un faisceau polarisé qui traverse normalement une lame cristallisée, se décompose en deux autres, d'intensité généralement différente, qui suivent la même route, leur séparation étant insensible à cause de la faible épaisseur de la lame. Ces faisceaux possèdent des vitesses différentes, de manière qu'à leur sortie, les ondulations ne sont plus d'accord ; celles des rayons qui marchent le plus lentement se trouvent en retard sur celles des autres rayons. Ces deux groupes de rayons ne peuvent cependant interférer, parce qu'ils sont polarisés à angle droit. Mais, si on les ramène dans un même plan de polarisation, au moyen d'un polariscope, ils pourront interférer, et le faisceau émergent présentera une intensité qui dépendra de la différence de marche des deux rayons à la sortie de la lame. Quand on opère avec de la lumière blanche, les longueurs d'ondulation des divers rayons simples, et par conséquent les différences de marche qui leur correspondent étant inégales, leurs intensités à l'émergence se trouveront modifiées dans des proportions différentes, et la couleur de ceux qui auront été le moins affaiblis dominera. Il reste à appliquer le calcul à ces considérations, pour comparer les résultats calculés à ceux que donne l'expérience.

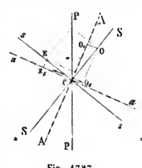


Fig. 1727

2421. Calcul des intensités des rayons émergents. — Soit PP (*fig.* 1727), la direction du plan de polarisation du faisceau incident, tracée sur un plan normal à ce faisceau ; SS la section principale de la lame cristallisée, *dont les faces sont parallèles* à l'axe, et α l'angle de ces deux plans. Si nous désignons par 1 l'intensité du faisceau incident polarisé, ce faisceau se divisera, dans la lame cristallisée, en deux autres, l'un d'intensité $O = \cos^2 \alpha$, polarisé dans la section principale, l'autre $E = \sin^2 \alpha$, polarisé dans un plan perpendiculaire *ss*, d'après la loi de Malus (2384). Chacun de ces faisceaux se partagera à son tour, dans l'analyseur bi-réfringent ; et, si nous désignons par β l'angle de la section principale AA de l'analyseur avec le plan primitif de polarisation PP, l'angle de cette section avec celle, SS, de la lame, sera $\alpha - \beta$, et les deux faisceaux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XVII, p. 102 et 267.

O et E donneront quatre faisceaux, qui, représentés par leur intensité, seront

$O_o = O \cos^2(\alpha-\beta) = \cos^2\alpha \cos^2(\alpha-\beta)$, polarisé suivant AA.
$O_e = O \sin^2(\alpha-\beta) = \cos^2\alpha \sin^2(\alpha-\beta)$, polarisé suivant *oa* perpendiculaire AA.
$E_o = E \sin^2(\alpha-\beta) = \sin^2\alpha \sin^2(\alpha-\beta)$, polarisé suivant AA.
$E_e = E \cos^2(\alpha-\beta) = \sin^2\alpha \sin^2(\alpha-\beta)$, polarisé suivant *aa*.

Ces quatre faisceaux ne sont pas sensiblement séparés, à cause de la faible épaisseur de la lame. O_o et E_o, polarisés suivant AA, forment le faisceau ordinaire, et O_e et E_e, polarisés suivant *aa*, composent le faisceau extraordinaire. Les intensités des faisceaux O_o et E_o ne s'ajoutent pas, comme on pourrait le croire au premier abord. En effet, le premier a subi la réfraction ordinaire dans la lame et dans l'analyseur, et le second a éprouvé la réfraction extraordinaire dans la lame, et la réfraction ordinaire dans l'analyseur ; et, comme les vitesses ordinaire et extraordinaire sont inégales, les deux faisceaux, à leur sortie de l'analyseur, ne sont plus d'accord, l'un d'eux se trouve en retard sur l'autre, et il en résulte qu'ils peuvent, en interférant, se détruire plus ou moins complétement, ou s'ajouter, suivant la différence de marche. Cette différence se produit toute entière dans la lame ; car, dans l'analyseur, les deux rayons éprouvent la réfraction ordinaire.

Or, en appelant d la différence de marche, et λ la longueur d'ondulation, on démontre par l'analyse, que l'*intensité* du faisceau résultant de la combinaison de deux faisceaux polarisés dans un même plan et ayant séparément les intensités i et i', est donnée par la formule

$$i^2 + i'^2 + 2ii \cos 2\pi \frac{d}{\lambda} = (i-i')^2 - 2ii\left(1 + \cos 2\pi \frac{d}{\lambda}\right). \qquad [1]$$

Remplaçant i et i' par les valeurs de O_o et E_o, il vient pour l'intensité I_o du rayon ordinaire

$$[\cos\alpha \cos(\alpha-\beta) - \sin\alpha \sin(\alpha-\beta)]^2 - 2 \sin\alpha \cos\alpha \sin(\alpha-\beta) \cos(\alpha-\beta)\left(1 - \cos 2\pi \frac{d}{\lambda}\right)$$

$$\text{ou} \qquad I_o = \cos^2\beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta) \sin^2\pi \frac{d}{\lambda} \qquad [2]$$

De même, les deux rayons O_e et E_e ne s'ajouteront pas intégralement, et ils auront, à leur sortie, une différence de marche, d'où résultera une intensité donnée par la formule [1]. De plus, il faut remarquer que les plans de polarisation de ces deux rayons se sont écartés dans les deux réfractions, pour venir se placer suivant *aa*, de manière que leurs vitesses de vibration se trouvent, au même moment, de signes contraires ; l'une de ces vitesses étant dans le sens de c à O_e, pendant que l'autre a lieu de c à E_e (*fig.* 1727) ; ce qui équivaut à un retard supplémentaire de $\frac{1}{2}\lambda$. Comme i et i' correspondent dans la formule [1] aux vitesses de vibration, puisque les intensités sont proportionnelles aux carrés des vitesses, il faudra changer le signe d'une des vitesses O_e et E_e,

et la formule [1] donnera, en faisant les mêmes transformations que pour le rayon ordinaire,

$$I_e = \sin^2\beta + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda} \qquad [3]$$

Les formules [2] et [3] donnent les intensités des rayons ordinaire et extraordinaire de chaque espèce de lumière simple, en fonction de la longueur d'ondulation λ qui lui correspond, et de la différence de marche d. Pour évaluer cette différence, qui se produit dans le passage à travers la lame, il suffit de prendre la différence des indices de réfraction ordinaire et extraordinaire de la lumière considérée, et de la multiplier par l'épaisseur de la lame. On obtient ainsi la différence de chemin qu'aurait parcouru cette lumière dans l'air, avec la vitesse ordinaire et extraordinaire, pendant le temps qu'elle met à traverser la lame. On voit que l'épaisseur doit être assez grande; sans cela la différence de route serait insensible.

Ce qui précède s'applique à une lame prise dans un cristal à deux axes; seulement SS représente alors la *ligne moyenne*. Nous allons voir avec quelle fidélité les formules [2] et [3] représentent tous les phénomènes.

2422. Explication des couleurs. — 1° La somme des valeurs de I_o et I_e est égale à 1; les *intensités* des deux images sont donc complémentaires. Mais la différence entre ces intensités varie avec λ; elle n'est donc pas la même pour les différentes couleurs simples; d'où il résulte que, si l'on emploie la lumière blanche, les rayons simples se trouveront en proportion différente dans les deux images; de là leur coloration, ou la *dispersion par double réfraction*. En outre, ces deux images réunies contenant toute la lumière incidente, puisque $I_o + I_e$ est égal à 1 pour toutes les couleurs, il se formera de la lumière blanche partout où il y aura superposition; les couleurs des deux images sont donc complémentaires.

2° La différence de route d varie d'une couleur à l'autre, puisqu'elle dépend de la différence des indices; mais elle est très petite pour le sulfate de chaux, le cristal de roche et la plupart des autres cristaux. Si donc on suppose d constant, et qu'on porte sa valeur dans les formules [2] et [3], ainsi que les différentes valeurs de λ, on obtiendra les intensités des faisceaux ordinaire et extraordinaire pour chaque couleur, et l'on pourra calculer, au moyen de la régle empirique de Newton (2060), la nuance formée, dans chaque faisceau, par le mélange de ces couleurs en proportions données par ces intensités. Les résultats ainsi obtenus sont d'accord avec ceux que l'expérience avait fournis à Biot, dans ses recherches sur la polarisation mobile.

3° On voit que, pour obtenir des couleurs, il est nécessaire que la lumière incidente soit polarisée. En effet, la lumière naturelle pouvant être considérée comme formée de rayons polarisés dans un plan qui prend toutes les directions possibles dans un temps imperceptible (2362), les deux images passeront pendant ce temps par les deux couleurs complémentaires et par toutes leurs

intensités successives, de sorte que les deux images seront blanches et d'égale intensité.

4° **Images blanches.** — Il est évident que les deux images seront blanches, quand les valeurs de I_o et I_e resteront les mêmes, quel que soit λ; c'est-à-dire quand le terme qui contient cette quantité sera nul, ce qui aura lieu quand on aura $\sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta) = 0$. On satisfait à cette condition en posant $\sin 2\alpha = 0$, ou $\sin 2(\alpha-\beta) = 0$. La première égalité donne

$$\alpha = 0, \qquad \alpha = 90°, \qquad \alpha = 180°, \qquad \alpha = 360° :$$

ce qui exprime que la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation. La seconde donne

$$\beta = \alpha, \qquad \beta = 90° + \alpha, \qquad \beta = 180° + \alpha, \qquad \beta = 360° + \alpha;$$

ce qui revient à dire que la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire à celle de l'analyseur. Ces conditions auraient pu être trouvées *à priori*; car, dans le premier cas, la lame ne donne qu'un seul faisceau (2385) que l'analyseur ne peut par conséquent colorer, et qu'il ne dédouble même plus quand on a $\beta = 0$, ou $\beta = 90°$. Dans le second, l'analyseur éteint un des faisceaux, et divise simplement celui qui reste.

5° **Constance des couleurs.** — Le second terme des valeurs de I_o et I_e n'a pas la même valeur pour les divers rayons simples; c'est pourquoi la couleur se manifeste quand ce terme n'est pas nul. Mais comme, pour chaque valeur de λ, l'intensité de la lumière est modifiée par le second terme, proportionnellement au facteur $\sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta)$, on voit que la teinte restera la même quand α et β varieront; seulement cette teinte sera d'autant plus faible, c'est-à-dire d'autant plus lavée de blanc, que ce facteur sera plus petit, pour la valeur de I_e; et d'autant plus prononcée qu'il sera plus grand, pour celle de I_o, dans laquelle le second terme est précédé du signe (—). Si α et β sont tels que le second terme soit négatif, le contraire aura lieu, c'est-à-dire que l'image ordinaire sera plus colorée, et l'extraordinaire, plus pâle. Le changement de signe a lieu au moment du passage par les images blanches, et c'est alors aussi qu'a lieu la *permutation des teintes*. Tout cela suppose que le premier terme est toujours plus grand que le second, ce qui a lieu effectivement, l'intensité de la lumière ne pouvant être négative.

6° **Maximum de coloration.** — Les deux images présenteront les couleurs les plus vives quand $\sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta)$ sera maximum; car ce produit est le coefficient, dans le second terme des valeurs de I_o et I_e, du facteur qui contient λ. et il détermine les différences d'intensité des images qui correspondent aux diverses couleurs simples. Si nous supposons d'abord α constant et quelconque, le maximum du produit $\sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta)$ aura lieu quand $2(\alpha-\beta)$ sera égal à 90°, ce qui suppose $\beta = \alpha + 45°$; c'est-à-dire quand les deux sections principales feront un angle de 45°. Si, en même temps, $\sin 2\alpha$ est maximum, ce qui a lieu quand $\alpha = 45°$, on aura le plus grand maximum d'éclat.

2423. Conséquences. — Il résulte de ce qui précède que : 1° Deux rayons polarisés à angle droit, et par conséquent incapables d'interférer, peuvent le faire quand on les ramène au même plan de polarisation, au moyen d'un polariscope. — 2° Il faut, pour que cela ait lieu, que les deux rayons polarisés à angle droit proviennent d'un rayon unique polarisé, et non d'un faisceau naturel. Car nous avons vu que, dans le dernier cas, on n'obtient pas les couleurs qui indiquent qu'il y a interférence (2422, 3°). Arago et Fresnel, dans les expériences de diffraction par lesquelles ils ont établi la direction transversale des vibrations de l'éther (2340), avaient constaté directement ce fait : les deux fentes étant couvertes par deux tourmalines dont les axes formaient un angle droit, les franges ne se manifestaient pas quand on faisait coïncider les plans de polarisation au moyen d'un polariscope. — 3° Quand le rayon primitif est polarisé, l'interférence résulte de la différence de marche des rayons ordinaire et extraordinaire dans la plaque cristallisée qui les polarise en sens inverse, augmentée ou non augmentée, suivant les cas, d'une demi-longueur d'ondulation (2421).

2424. Variation des couleurs avec l'épaisseur. — Si, α et β restant constants, on change l'épaisseur de la lame, à laquelle d est proportionnel, la valeur de d varie pour chaque espèce de lumière, et I_e et I_o changeant d'une manière différente suivant la valeur de λ, la couleur des images change. Mais il est à remarquer que le facteur $\sin^2 \pi d : \lambda$ reprenant périodiquement les mêmes valeurs pour des augmentations d'épaisseur correspondantes à un nombre entier de fois λ, les mêmes couleurs se reproduiront périodiquement quand l'épaisseur variera comme les nombres 1, 2, 3... Si cependant l'épaisseur devenait trop grande, les couleurs disparaîtraient, par suite de perturbations analogues à celles qui ont lieu dans les anneaux des lames minces (2299). On voit aussi que, pour obtenir une teinte d'un certain ordre, il faut que la lame soit d'autant plus mince que la différence entre les indices ordinaire et extraordinaire est plus grande ; et que l'épaisseur maximum est d'autant plus petite que cette différence est aussi plus grande. En effet, ce maximum est très petit pour le spath d'Islande.

Duplications parallèle et croisée. — Si l'on superpose deux plaques parallèles à l'axe et de même substance, il est évident qu'elles produiront le même effet qu'une seule plaque d'épaisseur égale à la somme de leurs épaisseurs, quand les axes seront dirigés parallèlement. Si les axes sont perpendiculaires, et si le cristal est positif, auquel cas le rayon extraordinaire possède une vitesse v_e plus grande que celle, v_o, du rayon ordinaire, la différence de marche de ces deux rayons sera $e\ (v_e - v_o)$, e représentant l'épaisseur de la lame. Le rayon extraordinaire, en pénétrant dans la seconde lame, ne donnera qu'un rayon ordinaire (2385), qui marchera avec la vitesse v_o, tandis que le rayon ordinaire, qui sort de la première lame, ne donnera qu'un rayon extraordinaire marchant avec la vitesse v_e ; et la différence de marche acquise par ces deux

rayons dans leur trajet à travers la seconde lame, sera e' $(v_e—v_o)$, v_e étant plus grand que v_o. La différence de marche totale à travers les deux plaques s'obtiendra donc en retranchant ces deux différences, car elles sont en sens contraire, le rayon qui va le plus vite dans la première, allant le plus lentement dans la seconde. Cette différence totale sera donc $(e-e')$ $(v_e—v_o)$; comme si la lumière avait traversé une plaque d'épaisseur égale à la *différence* de leurs épaisseurs.

Si les deux lames étaient de nature différente, et toutes deux de même signe, le résultat serait e $(v_e—v_o)—e'$ $(v'_e—v'_o)$; v'_e et v'_o étant les vitesses des deux rayons dans la seconde lame. Si les lames étaient de signe contraire, le même rayon aurait la plus grande vitesse dans les deux, et le retard serait le même que si l'épaisseur était $e+e'$. Pour retrouver l'effet de l'épaisseur $e—e'$, il faudrait placer les axes parallèles.

Si l'on avait plus de deux plaques, il est facile de voir ce qu'il y aurait à faire pour calculer la différence de marche.

2425. Changement de couleur avec l'inclinaison. — Quand la lame cristallisée est inclinée par rapport aux rayons incidents, pour chaque inclinaison, les changements d'intensité et les permutations de couleurs, quand on fait tourner la lame sur elle-même, suivent les mêmes lois que pour l'incidence normale. Mais si, en inclinant la lame par rapport aux rayons, on fait varier l'angle d'incidence, la couleur change, d'abord parce que l'épaisseur traversée par les rayons va en augmentant, mais aussi parce que les rayons formant avec les axes un angle qui varie, la différence de marche, à égalité d'épaisseur, est modifiée par cette circonstance. Considérons, par exemple, une lame à un axe, taillée parallèlement à l'axe. Si on l'incline en la faisant tourner autour de l'axe, les couleurs changeront par l'influence seule de l'épaisseur traversée ; car la différence de marche n'est pas alors modifiée par les variations de l'angle d'incidence (2318, 1°). Mais si la lame tourne autour d'une droite perpendiculaire à l'axe, à mesure qu'elle s'incline, les rayons réfractés se rapprochent de cet axe, ce qui tend à diminuer leur différence de marche (2318, 3°), pendant qu'elle augmente par l'effet du plus long trajet à travers la lame. Comme cette différence devient nulle, quelle que soit l'épaisseur, quand les rayons marchent suivant l'axe, on voit qu'il y aura une certaine inclinaison, pour laquelle une petite variation ne changera pas la différence de marche, et à partir de laquelle l'augmentation d'inclinaison fera diminuer cette différence au lieu de l'augmenter. Jusque là, les couleurs se succèdent comme si l'on augmentait l'épaisseur, et au-delà, comme si on la diminuait. — Si les faces de la lame étaient inclinées sur l'axe, de manière qu'on pût amener ce dernier à avoir la direction des rayons incidents parallèles, il n'y aurait plus de différence de marche, et l'on ne verrait plus de coloration, ainsi que le montre l'expérience. — Si la lame et le polariscope sont tournés de manière à donner une image blanche, cette image restera toujours blanche pendant qu'on inclinera la lame ; car le terme qui contient $d : \lambda$, dans les valeurs de I_o et I_e, est alors nul.

Si la lame tourne autour d'une droite dirigée dans son plan obliquement à l'axe, les phénomènes se compliquent, et les effets participent de ceux qui se manifestent dans les deux cas particuliers que nous venons d'examiner.

Avec une lame *à deux axes*, les résultats sont encore plus compliqués. Il y a cependant certains cas particuliers pour lesquels ils sont assez faciles à saisir : 1° Si l'on fait tourner la lame dans un sens quelconque autour d'une droite parallèle à la *ligne moyenne*, les couleurs changent comme si l'épaisseur augmentait, jusqu'à ce qu'elles passent au blanc. — 2° Si l'on fait tourner la lame autour d'une droite parallèle à l'axe moyen d'élasticité, qui est perpendiculaire au plan des axes optiques, et si l'on suppose la lame perpendiculaire à la ligne moyenne, comme cela a lieu, par exemple, pour les feuilles de mica, on voit les couleurs changer comme si la lame diminuait d'épaisseur, jusqu'à ce que celui des axes optiques qui se rapproche des rayons parallèles incidents, coïncide avec leur direction ; il y a alors obscurité, comme en l'absence de la lame. Si l'on dépasse cette position, les couleurs reparaissent et se succèdent comme si la lame devenait de plus en plus épaisse, et passent par tous les ordres, jusqu'à ce que la lumière devienne blanche.

2426. Colorigrades et cyanomètres. — Biot a tiré parti des changements de couleur des lames cristallisées quand on les incline, pour établir une échelle des couleurs. L'instrument destiné à cet usage se nomme *colorigrade*. Il consiste simplement en une lame de mica, qu'on incline plus ou moins entre un polarisateur et un polariscope, de manière à obtenir une succession de nuances qu'on peut toujours retrouver en observant, sur un cercle divisé, sous quelle inclinaison chacune d'elles se produit. Au lieu d'une seule lame, il vaut mieux en employer deux, qu'on incline plus ou moins l'une par rapport à l'autre, et dont on croise plus ou moins les axes, de manière à obtenir une grande variété de nuances.

Cyanomètre de Biot. — Une lame de mica d'épaisseur convenable pour donner un bleu pur, mais plus ou moins lavé de blanc suivant l'angle que fait sa section principale avec celle du polariscope, forme un *cyanomètre*. Chaque ton est exprimé par l'angle des deux sections principales ; le bleu le plus vif se montre quand cet angle est de 45°, et il passe au blanc quand l'angle est nul, ou de 90° (2422).

Cyanomètre d'Arago. — Cet instrument n'est autre chose que le *polarimètre* décrit plus haut (2397), auquel on ajoute une feuille de papier tendue perpendiculairement à son axe, derrière la pile de glace. La lame de cristal de roche placée en *c* (*fig.* 1718) a 5^{mm} d'épaisseur, et la couleur qu'elle donne change avec l'angle des sections principales du prisme bi-réfringent placé en *o*, et de la pile de glace. Parmi les couleurs qu'on obtient en faisant tourner le prisme, se trouve la nuance bleu de ciel, et cette nuance est d'autant plus prononcée que la pile polarise une plus grande proportion de la lumière qu'elle transmet. Pour évaluer la teinte bleue d'un point du ciel, il suffira de tourner

l'instrument vers ce point, et de faire varier l'inclinaison de la pile de glace, jusqu'à ce que le bleu observé dans l'instrument paraisse identique avec la nuance que présente le ciel. L'inclinaison de la pile servira de mesure à la teinte qu'on cherche à exprimer.

Application à la photométrie. — Le même instrument peut être employé comme photomètre; on dispose deux feuilles de papier, l'une perpendiculairement, l'autre parallélement à son axe, et à égale distance du centre de la pile de glaces. On incline celle-ci de 45° sur l'axe, et l'on observe dans l'instrument, les images superposées et les couleurs complémentaires des deux feuilles de papier. Comme il y a la même proportion de lumière polarisée dans la réflexion et dans la réfraction (2229), si les deux feuilles de papier sont également inclinées, les deux images, en se superposant, formeront du blanc. On éclairera donc les deux feuilles, séparément, par les lumières à comparer, on éloignera la plus intense jusqu'à ce que les deux images forment du blanc, et l'on écrira que les intensités des lumières sont en raison directe des carrés de leurs distances respectives aux feuilles de papier. Ce procédé ne s'applique évidemment qu'aux lumières incolores.

II. Couleurs produites par les corps dont la structure a été modifiée.

2427. Nous avons dit (2312) que tout ce qui trouble l'homogénéité des corps leur donne la propriété de produire la double réfraction. Mais le plus souvent les deux rayons s'écartent trop peu pour qu'on puisse observer la bifurcation. La coloration que les substances bi-réfringentes impriment à la lumière polarisée fournit alors un moyen d'observation trés délicat.

2428. Verre trempé. — Si l'on trempe une plaque épaisse de verre, en la chauffant au rouge et la faisant refroidir en l'agitant modérément dans l'air, elle acquiert la propriété de donner, dans la lumière polarisée paralléle, de vives couleurs formant des figures qui dépendent du contour des plaques, de la position du polariscope, et de la manière dont la plaque est tournée dans son propre plan. Ces phénoménes ont été découverts par M. Seebeck, en 1813, pendant que M. Brewster découvrait, de son côté, que les larmes bataviques dont on est parvenu à user la panse, donnent de vives couleurs dans la lumière polarisée. Les phénoménes s'observent facilement avec l'appareil de Norremberg. Ils sont très brillants quand la plaque est posée sur le miroir inférieur, les rayons polarisés la traversant alors deux fois. On peut aussi projeter l'image sur un écran, au moyen de l'appareil (*fig.* 1600), et en prendre le dessin photographique, en ayant soin d'absorber les rayons chimiques obscurs, au moyen d'une solution de sulfate de quinine (2066) (25 de sel dans 100 d'eau aiguisée d'acide sulfurique). On peut enfin les observer sans polarisateur, en recevant dans le polariscope, la lumière des nues réfléchie obliquement sur la face inférieure de la plaque.

Les couleurs acquiérent la plus grande vivacité, quand le polariscope est placé

de manière à éteindre la lumière polarisée incidente, et alors on y remarque des bandes noires. Si ensuite on tourne le polariscope de 90°, les parties noires sont remplacées par des parties blanches, et chaque couleur, par sa couleur complémentaire. Entre ces deux positions du polariscope, on voit les courbes colorées se contourner et se déplacer, de manière à passer graduellement d'une disposition à l'autre. Les *fig.* 1728, 1729 représentent les dessins formés dans une plaque carrée placée sur le support *n* de l'appareil de Norremberg, et dont deux côtés sont parallèles au plan primitif de polarisation. Quand le polariscope est tourné de manière à éteindre la lumière polarisée, on a la *fig.* 1728 ; quand on la tourne de 90°, la *fig.* 1729. Quand une des diagonales de la plaque est parallèle au plan de polarisation, les bras de la croix noire (*fig.* 1729) se courbent en forme d'S. Si le verre trempé a été refroidi avec ménagement, on peut le tailler, comme le verre recuit ; et, suivant la forme qu'on lui donne, on obtient des dessins d'une grande variété. M. Seebeck a obtenu des figures colorées, avec des plaques de borax fondues et refroidies rapidement, de sel marin rapidement desséchées, et de gomme arabique obtenues par une prompte évaporation.

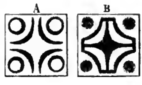


Fig. 1728. Fig. 1729.

Ces divers résultats s'expliquent par les irrégularités de structure occasionnées par la trempe, dont les effets sont plus prononcés vers la surface et vers les angles que dans les parties intérieures. L'irrégularité de distribution des molécules fait que les rayons parallèles éprouvent, dans les différentes régions qu'ils traversent, la double réfraction à des degrés divers; d'où résulte une coloration variable. Les figures présentent une symétrie qui dépend de celle du contour de la lame, sur laquelle la trempe a dû agir de la même manière dans les parties qui présentent la même configuration. On peut modifier à l'infini la forme des courbes colorées, en recuisant certaines parties d'une même plaque de verre, par l'application de pièces de métal brûlant de différentes formes.

Une plaque circulaire, sur laquelle la trempe agit symétriquement tout autour de son axe, donne des anneaux concentriques irisés, coupés par une croix noire dont un des bras est parallèle au plan primitif de polarisation. Cette croix s'explique facilement en remarquant qu'il résulte de la régularité de distribution des molécules autour de l'axe de la plaque, que chaque plan diamétral est une section principale. Or, toute lumière disparaît dans la section principale parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation quand le polariscope est tourné à l'obscurité; car, s'il s'agit d'une tourmaline, qui ne laisse passer que le rayon extraordinaire, on voit que la valeur de I_e (2421) devient nulle quand on a $\beta = 0$, et $\alpha = 0$ ou $\alpha = 90$.—Si le polariscope tourne de 90° on a $I_e = \sin^2\beta = 1$, ce qui explique la croix blanche qui remplace alors la croix noire. Souvent les anneaux et la croix sont déformés; ce qui tient à ce que la trempe n'a pas agi régulièrement sur le contour.

M. Brewster a donné le moyen suivant, de reconnaître les points où le verre, rendu bi-réfringent par la trempe, est positif ou négatif. On pose sur la plaque une lame d'un cristal positif, de manière que son axe soit normal à la courbe colorée qui passe par le point considéré. Si la couleur pâlit, c'est que le verre en ce point est positif, comme le cristal. Si la couleur devient plus vive, il est négatif, d'après ce que nous avons vu plus haut (2424).

2429. Polariscope de M. Babinet. — Cet instrument consiste simplement en une plaque de verre trempé, ajustée à l'extrémité d'un tube dont l'autre extrémité porte une tourmaline ou un prisme de Nicol. La moindre proportion de lumière polarisée traversant cet instrument est décélée par les figures colorées qui se manifestent. Le polariscope de M. Babinet sert particuliérement à l'étude de la polarisation de l'atmosphére.

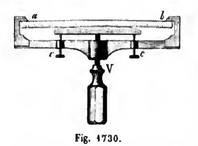


Fig. 1730.

2430. Actions mécaniques. — C'est encore à M. Brewster que nous devons la connaissance des phénoménes qui suivent. On s'en rend facilement compte par les mêmes considérations que pour le verre trempé.

Induration. — M. Brewster ayant fait sécher de la colle de poisson dans des moules de verre, de manière à en former des plaques de différentes formes, obtint des figures analogues à celles que donnent des plaques de verre trempé de même forme. C'est que la colle, en se desséchant, éprouve un retrait différent, prés des bords et dans les parties centrales où la solidification se fait plus lentement.

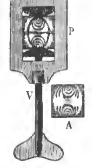


Fig. 1731.

Flexion. — Une régle en verre *ab* (*fig.* 1730), légérement infléchie au moyen d'une vis V, donne des bandes colorées généralement paralléles à sa longueur, et dont le nombre et la vivacité augmentent avec la flexion.

Compression. — Si l'on comprime une plaque épaisse de verre entre deux talons arrondis, au moyen d'une vis V (*fig.* 1731), cette plaque traversée par la lumière polarisée et observée au moyen d'un analyseur, présente, autour des points de compression, des anneaux diversement colorés. On voit en A la figure formée quand la ligne de compression est inclinée de 45° sur le plan primitif de polarisation, et en P celle qui se forme quand elle est perpendiculaire à ce plan, l'analyseur étant placé de maniére à donner l'obscurité. Des plaques de colle de poisson, de gelée de pied de veau, et surtout celles qui étaient composées d'un mélange de cire blanche et de résine, ont donné à M. Brewster des phénomènes analogues.

Vibrations. — Biot ayant excité des vibrations longitudinales dans une

bande de verre de 2^m de longueur placée entre le polariscope et le polarisateur de son appareil (2343) disposé pour donner l'obscurité, vit, à chaque friction, jaillir une vive lumière, dont l'éclat et la couleur dépendaient du mode de frottement et de son énergie. Il avait soin de placer un nœud dans l'axe de l'appareil, parce que c'est aux nœuds que les distances des molécules changent le plus.

2431. Dilatation. — On fait chauffer régulièrement dans de l'huile bouillante une plaque de verre épaisse, et on la place dans un cadre métallique de même forme, qui la refroidit promptement sur son contour, de manière à en détruire momentanément l'homogénéité ; ou bien, on fait chauffer le cadre tenu par un manche assez long (*fig.* 1732), et l'on y introduit la plaque de verre, qui s'échauffe par son contour. Dans les deux cas, on obtient avec la lumière polarisée, des figures irisées analogues à celles des plaques trempées de même forme, et qui disparaissent quand la température est devenue uniforme. On peut reconnaître, en superposant une lame cristallisée, qu'un disque de verre échauffé par son contour est négatif, tandis qu'il est positif quand on procède par refroidissement. En superposant les deux plaques supposées de même forme, les couleurs disparaissent; ce qui prouve qu'elles sont de signe contraire, puisque la différence de marche acquise dans la première, a été annulée par une différence en sens contraire, dans la seconde.

Fig. 1732.

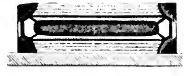


Fig 1733.

Une plaque rectangulaire allongée, posée sur une règle de fer très chaude, donne des bandes irisées (*fig.* 1733) qui, chose singulière, sont disposées à peu près de la même manière près du bord échauffé et près du bord opposé ; ce qui tient probablement à ce que l'écartement des molécules produit par la dilatation, est accompagné d'une flexion qui rapproche celles du bord opposé. Ces bandes colorées se déplacent et se modifient, pendant que la chaleur se propage dans la plaque.

§ 2. LUMIÈRE CONVERGENTE.

I. Anneaux colorés dans les cristaux à un axe.

2432. Cristaux à un axe. — Nous avons considéré dans ce qui précède, des rayons polarisés incidents parallèles, c'est-à-dire parcourant tous le même espace dans l'intérieur de la lame. Nous allons supposer maintenant que les rayons sont convergents, et forment un large cône dont l'axe est perpendiculaire

à la lame. Les rayons les plus éloignés de l'axe de ce cône parcourent alors un plus grand espace dans l'intérieur de la lame ; la couleur observée en regardant à travers un polariscope, ne peut donc plus être uniforme. Considérons d'abord les cristaux à un axe.

Anneaux autour de l'axe. — Supposons une plaque de spath d'Islande taillée *perpendiculairement* à l'axe, et recevant un cône de rayons polarisés qui entrent dans l'œil après avoir traversé un prisme de Nicol ou une tourmaline. Si la section principale du polariscope est paralléle au plan primitif de polarisation (de maniére à éteindre les rayons en l'absence de la lame cristallisée), on aperçoit, avec la lumiére homogène, une série d'anneaux concentriques alternativement noirs et brillants, dont les distances et les diamétres sont d'autant plus grands que la lame est plus mince. Si la lame est trop épaisse, ces anneaux disparaissent. Mais on peut encore les apercevoir avec la lumière de la lampe monochromatique, avec laquelle ils présentent, dans tous les cas, une netteté bien plus grande qu'avec toute autre espèce de lumière. Les anneaux de même ordre sont aussi, *en général*, d'autant plus grands que les rayons sont plus réfrangibles. Il en résulte qu'avec la lumière blanche, on verra des anneaux irisés dont le violet occupera *le plus souvent* la partieextérieure. Ces anneaux sont traversés par une épaisse croix noire, dont l'un des bras est paralléle au plan primitif de polarisation, et dont les bords sont diffus et les extrémités épanouies (*fig.* 1734).

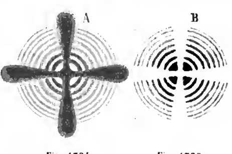


Fig. 1734. Fig. 1735.

Si l'on fait tourner le polariscope sur lui-même, on voit les anneaux lumineux s'étendre graduellement, et venir prendre la place des anneaux obscurs ; en même temps la croix noire tourne dans le même sens, en s'effaçant peu à peu, et est remplacée par une croix blanche, quand la rotation est de 90° (*fig.* 1735). Si l'on emploie la lumiére blanche, les couleurs des anneaux sont complémentaires de celles qu'ils présentaient aux mêmes points dans la première position du polariscope. On s'en assure en employant un polariscope bi-réfringent ; on obtient une double image, et l'on a de la lumière blanche aux points de croisement de deux anneaux de même ordre. Ces phénomènes ont été découverts par M. Brewster, dans l'émeraude, le rubis, la topaze..., et même dans des lames de glace taillées horizontalement dans une couche compacte formée sur une eau tranquille ; Wollaston les a observés dans le spath d'Islande, qui donne les plus beaux résultats. Tous les cristaux à un axe, excepté le cristal de roche, qui présente des phénoménes particuliers que nous étudierons plus tard, produisent les mêmes effets. Cependant la croix est

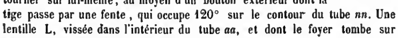
souvent contournée, mal dessinée, les anneaux déformés ; ce qui doit être attribué à des irrégularités dans la cristallisation, d'autant plus sensibles que la double réfraction est trés faible dans le voisinage de l'axe.

2433. Appareils et mode d'observation. — Pour obtenir un faisceau polarisé convergent, on emploie diverses dispositions, que nous allons examiner.

Pince à tourmaline. — Ce petit appareil (*fig.* 1736) consiste simplement en deux plaques de tourmaline pouvant tourner sur elles-mêmes dans deux anneaux *a*, *b*, fixés aux extrémités d'un ressort *c* en forme de pince, et entre lesquels est pressée la lame cristallisée enchâssée dans un disque de liége. Si l'on regarde la lumière des nuées à travers ce systéme, on voit les anneaux, avec la croix noire quand les axes des tourmalines sont perpendiculaires, et avec la croix blanche quand ces axes sont paralléles. La tourmaline extérieure sert à polariser les rayons, qui convergent vers la pupille placée trés prés de la seconde tourmaline.

Fig. 1736.

Appareil d'Herschel. — Cet appareil consiste en deux tubes *nn* et *aa* (*fig.* 1737), pouvant tourner l'un dans l'autre. En *c* et *t* sont des tourmalines servant de polarisateur et de polariscope. La lame cristallisée *ll* est fixée à un anneau qu'on peut faire tourner sur lui-même, au moyen d'un bouton extérieur dont la tige passe par une fente, qui occupe 120° sur le contour du tube *nn*. Une lentille L, vissée dans l'intérieur du tube *aa*, et dont le foyer tombe sur la lame *ll*, est destinée à égaliser l'éclat du champ de la vision, quand on se sert d'une lumiére artificielle. Les rayons qui partent du foyer, situé dans la lame, entrent dans l'œil en divergeant. La lumiére ne traversant qu'une région trés étroite de la lame, on peut choisir un point où il n'y a pas de défaut de cristallisation.



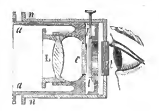


Fig. 1737.

Appareil de M. Soleil. — La lumiére polarisée par réflexion sur le miroir V (*fig.* 1738), que l'on incline convenablement au moyen du genou o, traverse une lentille *l*, *l*, et va faire son foyer sur la lame cristallisée *c*. Les rayons sortent de cette lame en divergeant, aprés que chaque pinceau a été modifié suivant la longueur de son trajet dans la lame, longueur qui varie avec l'obliquité. Les pinceaux traversent ensuite un oculaire d'Huyghens *l' l''*, *l' l''* (2199). Ils forment chacun un foyer sur le plan focal *f f* de la lentille *l'*, de maniére qu'il se produit en *f f* une image des courbes engendrées par la lame *c*, image que l'on regarde à travers la loupe *l''* et l'analyseur *a*, *a*. En *f f* est disposé un micrométre *m*, représenté à part en M. Il porte trois fils, dont deux paralléles entre eux et perpendiculaires au premier, pouvant se rapprocher ou s'écarter l'une de l'autre au moyen d'une vis, dont une partie est dextrorsum, et l'autre sinistrorsum. On peut, en tournant le micrométre sur lui-même,

mesurer avec les fils parallèles, les diamètres des courbes dans différentes directions. La lame, *c*, est serrée par une pince qui peut tourner autour d'un axe horizontal, de quantités mesurées par une tête divisée *n* et un vernier que l'on observe avec la loupe *v*. Le support de la pince peut aussi tourner en *o'*, de manière qu'on peut régler facilement la position de la lame.

On peut enfin observer les phénomènes, au moyen de l'appareil de Norremberg (*fig.* 1725), en plaçant la lame cristallisée tout près de l'analyseur, ou en la posant sur la glace étamée *o*, et amenant au-dessus la lentille *l*, à une hauteur égale à son foyer principal. Les rayons réfléchis par la lame de verre *vv* tombent en convergeant sur le cristal, et en sortent avec le même degré de divergence, comme dans l'appareil de M. Soleil.

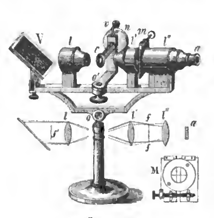


Fig. 1738.

Projection des images. — L'appareil de M. Soleil (*fig.* 1738) permet de projeter les images colorées sur un écran, de manière à pouvoir en conserver le dessin photographique. Pour cela, on place la lame cristallisée *c*, soit au foyer *ff* de la lentille *l'*, soit au foyer antérieur *f'* de la première lentille *l*. Dans ce dernier cas, chaque point de la lame émet un pinceau conique de rayons modifiés, qui devient cylindrique à sa sortie de la lentille *l*. Les pinceaux cylindriques se croisent entre les lentilles *l* et *l'*, forment des images en *ff*, et ces images sont projetées par la lentille *l''*, comme dans le microscope solaire. Si la lame est en *ff*, les lentilles *l* et *l'* ont pour effet de donner aux rayons qui s'y croisent une divergence plus grande que celle qu'ils ont en partant immédiatement du réflecteur V.

On peut encore employer l'appareil (*fig.* 1726). La lame est placée en *cc*, où elle reçoit le faisceau polarisé rendu convergent par la lentille L ; et la lentille *a* donne l'image des courbes engendrées par cette lame.

Enfin, M. Herschel obtient la projection des images, au moyen de son petit appareil (*fig.* 1737). Le foyer de la lentille se forme sur la lame, où les rayons se croisent en prenant la teinte qui leur est imprimée suivant leur obliquité sur la lame mince, et ils forment une image des courbes colorées, d'une manière analogue à ce qui a lieu dans la chambre noire simple.

2434. EXPLICATION DES ANNEAUX AUTOUR DE L'AXE. — 1° Supposons le polariscope tourné à l'obscurité ; par exemple, si c'est une tourmaline, que son axe soit parallèle au plan primitif de polarisation, on apercevra seulement l'image

extraordinaire venant de la lame cristallisée ; on aura $\beta = 0$, et la formule [3] (2421), qui donne l'intensité I_e de cette image, deviendra

$$I'_e = \sin^2 2\alpha \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

Si nous considérons les rayons incidents dans un plan parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation, la section principale qui leur correspond sera dans le même cas ; nous aurons donc $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90°$, et la valeur de I'_e deviendra nulle ; ce qui explique la croix noire.

La valeur de I'_e devient aussi nulle, quel que soit α, quand d est tel que $d : \lambda$ soit égal à un nombre entier quelconque, 1, 2, 3.... Or, $d : \lambda$ reste constant pour tous les rayons également inclinés par rapport à l'axe ; on aura donc des anneaux noirs dont les diamètres seront d'autant plus grands qu'il faudra, pour obtenir une même valeur de d, s'écarter davantage de l'axe, c'est-à-dire que la lame sera plus mince. Du reste, les diamètres ne varient pas suivant les mêmes lois que ceux des anneaux dans les lames minces ; car l'épaisseur traversée n'est pas seule à modifier la différence de marche, cette différence croissant aussi avec l'obliquité, à partir de l'axe, où elle est nulle (2417). Cependant on avait trouvé par expérience que les anneaux suivaient les mêmes lois que ceux des lames minces ; ce qui tient à ce que la seconde influence est trop faible pour produire des effets appréciables, avec des anneaux dont les contours sont diffus.

Pour les valeurs de $d : \lambda$ comprises entre 1, 2, 3...., la valeur de I'_e ne sera pas nulle ; on aura donc, entre les anneaux noirs, des anneaux lumineux, dont l'intensité sera maximum pour $\alpha = 45°$, et ira en diminuant, de cet azimut à $\alpha = 0$ et $\alpha = 90°$; ce qui explique la diffusion des contours de la croix noire. Les valeurs de $d : \lambda$ étant différentes pour les diverses couleurs, les anneaux seront irisés, avec la lumière blanche.

2° Supposons $\beta = 90°$, c'est-à-dire que le polariscope soit tourné de manière à donner le maximum de lumière en l'absence de la lame. Le faisceau ordinaire passera seul, et la formule [2] (2421) deviendra

$$I'_o = 1 + \sin^2 2\alpha \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda} = 1 - I'_e.$$

Si $\alpha = 0$, ou $\alpha = 90°$, on a $I'_o = 1$; ce qui explique la croix blanche. Dans les azimuts intermédiaires, l'intensité étant, pour les anneaux brillants, l'unité diminue de l'intensité trouvée dans la première position du polariscope, les couleurs seront complémentaires de celles qu'on observe alors.

2° Si, à partir de la position pour laquelle on a $\beta = 0$, on fait tourner peu à peu le polariscope, et si l'on considère ce qui se passe dans son plan principal, pour lequel on a $\alpha - \beta = 0$, l'intensité du faisceau émergent, donnée par la formule [3], devient $I'_e = \sin^2 \beta$, valeur qui augmente en même temps que β ;

ce qui montre que la croix noire va en s'effaçant, tout en suivant le mouvement du polariscope, pour se changer en une croix blanche, dont l'éclat augmente jusqu'à ce que l'on ait $\beta = 90°$.

Si la plaque, au lieu d'être perpendiculaire à l'axe, lui était un peu oblique, on voit que les différences de marche ne seraient pas égales pour des distances égales à la normale, et les courbes prendraient la forme d'ovales dont le grand axe serait dans le plan normal passant par l'axe.

2435. Remarques. — 1° Il résulte de l'explication qui précède, que les résultats sont les mêmes avec les cristaux positifs et les cristaux négatifs. Mais le signe des cristaux intervient dans les phénomènes, quand on superpose deux lames perpendiculaires à l'axe. Si ces lames sont de même signe, l'effet est le même que si, à la première, d'épaisseur *e*, on en superposait une autre de même substance et d'épaisseur *e'* capable de donner des anneaux de même diamétre que la seconde. Mais si celle-ci est de signe contraire, le résultat sera celui que produirait une lame d'épaisseur égale à la différence *e—e'*. Car le rayon qui a la plus grande vitesse dans la première plaque, se trouve avoir la plus faible dans la seconde, et *vice versâ*. Si les deux lames de signe contraire donnent séparément des anneaux de même diamétre, ces anneaux disparaissent dans la lumière blanche, quand elles sont superposées.

Il résulte de là un nouveau moyen de trouver le signe d'un cristal : on en sépare une lame normale à l'axe, et on l'applique sur une lame de spath d'Islande. Si les anneaux formés par celui-ci dans la lumière simple sont rétrécis, le cristal est *négatif* comme lui ; s'ils sont agrandis, il est *positif*.

2° Les anneaux dont nous nous occupons ressemblent beaucoup à ceux que produisent des disques de verre trempés ou échauffés sur leur contour. Mais il ne faut pas oublier que les premiers se manifestent également dans tous les points de la lame cristallisée, tandis que les autres ne se produisent qu'avec des rayons parallèles, et dans des points particuliers de la plaque ; l'axe autour duquel les molécules sont arrangées symétriquement étant une ligne unique, et non une simple direction, comme chez les cristaux.

2436. Distribution des couleurs dans les anneaux. — Plusieurs physiciens avaient admis que les couleurs des anneaux que forme la lumière polarisée autour de l'axe des cristaux, étaient distribuées de la même manière que dans les anneaux produits entre deux lentilles, et il paraît en être ainsi pour le spath d'Islande, la glace, le béril, la tourmaline. Mais ce que nous avons dit ci-dessus de la double cause qui détermine les diamètres des anneaux (2434), prouve que cette loi ne peut être exacte ; et, en effet, un assez grand nombre de cristaux s'en éloigne évidemment, comme l'hyposulfate de chaux. Il en est même avec lesquels l'ordre des couleurs est renversé. L'*apophyllite* de Cipit, en Tyrol (silicate hydraté de chaux et potasse), présente à cet égard des résultats trés curieux. Avec la lumière blanche, les anneaux ne présentent que les teintes violet-sombre et jaune-verdâtre. Aussi, quand on opère avec les différentes lumières simples, obtient-on des anneaux sensiblement égaux. On

trouve aussi des échantillons assez rares, qui ne donnent pas d'anneaux avec la lumière jaune. Quand on opère avec des rayons de plus en plus réfrangibles, on voit les anneaux grandir très rapidement, devenir infinis pour les rayons jaunes, puis reparaître en allant en diminuant, et les anneaux violets rester plus grands que les rouges. Aussi, avec la lumière blanche, l'ordre des couleurs est-il inverse de celui que présentent les anneaux dans les lames minces. Ces résultats se conçoivent assez facilement quand on sait que l'apophyllite, très peu bi-réfringente, est négative pour l'une des extrémités du spectre, et positive pour l'autre; de manière qu'elle n'exerce pas la double réfraction sur les rayons moyens.

2437. Anneaux et couleurs *per se*. — On peut observer des anneaux colorés dans des lames cristallisées, sans faire usage de polarisateur ni de polariscope. Par exemple, si l'on pose sur un fond noir une lame de topaze, et qu'on reçoive dans l'œil, de plus en plus obliquement et en faisant tourner la lame sur elle-même, la lumière réfléchie à sa seconde surface, on finit par apercevoir des anneaux irisés. Ce phénomène est de la nature de ceux que nous venons d'étudier : ici, la lumière incidente est polarisée soit par l'atmosphère, soit par réflexion sur des vitres, des meubles vernis, etc. Le rayon entre dans la direction d'un des axes, et la réflexion à la surface inférieure remplace le polariscope. Si l'on se sert de la lumière directe du soleil, ou d'un point *neutre* de l'atmosphère (2354), il n'y a plus d'anneaux.

On peut obtenir des anneaux avec de la lumière incidente parfaitement neutre réfléchie à la seconde surface de la lame, en recevant cette lumière dans un polariscope. Dans ce cas, la lumière est polarisée par réflexion, et la lame agit sur le rayon réfléchi, qui la traverse avant d'émerger.

On trouve des échantillons de certains cristaux qui donnent des couleurs quand ils sont traversés par de la lumière entrant à l'état neutre; le spath d'Islande présente souvent cette particularité : c'est qu'il renferme alors des lames *hémitropes*, c'est-à-dire dans lesquelles l'ordre de la cristallisation est renversé. Ces lames sont perpendiculaires à la section principale du rhomboèdre, et parallèles à ses arêtes. Un rayon qui les traverse suivant l'axe, est d'abord polarisé dans son trajet à travers la partie antérieure du cristal, puis il trouve une autre portion de cristal, qui fait fonction de polariscope.

II. Courbes colorées des cristaux à deux axes.

2438. Anneaux autour des axes. — En étudiant les couleurs formées par la lumière polarisée, dans un grand nombre de cristaux, M. Brewster en rencontra qui lui donnèrent des anneaux dans deux directions différentes, et c'est ainsi qu'il découvrit et distingua les cristaux à deux axes.

Supposons d'abord que l'on taille dans un cristal de cette espèce, une lame sensiblement perpendiculaire à l'un des axes, et qu'on la place entre un pola-

risateur et un polariscope tourné à l'obscurité, on voit autour de l'axe, des anneaux alternativement noirs et brillants dans la lumière simple, et irisés dans la lumière blanche. Ces anneaux ont une forme ovale d'autant plus prononcée, que l'angle des deux axes est plus grand; ils marquent en se rétrécissant, un *pôle* situé sur l'axe et plus éloigné de leur contour, du côté de l'autre axe que du côté opposé. Par ce point, passe une bande noire à extrémités épanouies, et dont la position dépend de celle du plan des axes. Si ce plan est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, la bande est droite et dirigée dans le plan des axes (*fig.* 1739). Si alors on fait tourner la plaque sur elle-même, la bande noire tourne en sens contraire avec la même vitesse, et elle se courbe légèrement en forme d'hyperbole tangente par le sommet à la perpendiculaire au plan des axes, et présentant sa convexité du côté de l'autre axe. Si le polariscope est tourné de 90°, la bande noire est remplacée par une bande blanche, et les couleurs des anneaux, par leurs couleurs complémentaires. Le mica, dont la ligne moyenne est perpendiculaire aux lames obtenues par clivage, se prête bien à l'observation de ces phénoménes.

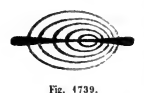


Fig. 1739.

2439. Courbes autour des deux axes. — Quand la lame est taillée perpendiculairement à la ligne moyenne, et que l'angle des axes est suffisamment petit, comme pour le nitre, dont l'angle des axes est de 5 à 6°, on aperçoit simultanément les anneaux formés autour des deux axes. Ces anneaux s'allongent du côté de la ligne moyenne; et ceux qui sont d'un certain ordre, d'autant moins élevé que la lame est plus mince, se réunissent de manière à former une seule courbe (*fig.* 1740). Quand le plan des axes est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, les bandes noires se réunissent et sont traversées par une seconde bande noire très diffuse, formant une croix avec la première, comme on le voit en A. Si l'on fait tourner la lame sur elle-même, le système des courbes tourne avec elle dans le même sens, la croix

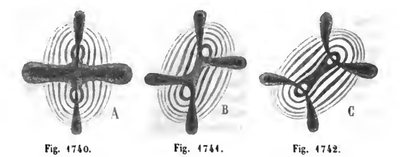


Fig. 1740. Fig. 1741. Fig. 1742.

noire se sépare en deux parties, dont l'angle s'arrondit de plus en plus (*fig.* 1741), et qui forment deux branches d'hyperbole quand le plan des axes fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation (*fig.* 1742), il est à remarquer que les directions générales des branches des bandes noires sont toujours parallèles ou perpendiculaires au plan primitif de polarisation. Au-delà de 45°, on retrouve les mêmes apparences que de 0° à 45°, et dans les quatre angles droits, les effets sont les mêmes.

Si le polarisateur et la lame restant fixes, on fait tourner le polariscope, on voit les bandes noires se déplacer dans le sens de la rotation, s'affaiblir et disparaître, pour être remplacées par de la lumière blanche occupant la même place, quand la rotation est de 90°. Pendant ce mouvement, l'ensemble des courbes est resté dans la même position, mais les couleurs sont devenues complémentaires.

2440. Forme des courbes isochromatiques. — M. Herschel ayant projeté sur un écran l'image des courbes formées par la lumière simple, et en ayant dessiné le contour avec beaucoup de soin, trouva que le produit de deux rayons vecteurs menés des pôles à un point quelconque d'une de ces courbes est constant. Cette propriété appartient à une *lemniscate*, courbe dont l'équation, rapportée à des axes rectangulaires dont un passe par les pôles, et qui se coupent à égale distance de ces points, est

$$(x^2+y^2+a^2)^2=a^2(b^2+4x^2).$$

$2a$ représente la distance des pôles, et b un paramètre qui change d'une courbe à l'autre. Le produit ab est égal au produit de deux rayons vecteurs quelconques. Ce produit, et par conséquent b, varie d'une courbe à l'autre, suivant la série des nombres 0, 1, 2, 3, 4..... pour les lignes lumineuses, et suivant la série $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$..... pour les lignes noires. Pour une même courbe, le produit ab varie en raison inverse de l'épaisseur de la lame.

La valeur de a change avec l'angle des axes. Quand cet angle est nul, les lemniscates deviennent des circonférences traversées par une croix noire, de quelque manière qu'on tourne la lame dans son propre plan. L'équation de la lemniscate devient, dans ce cas, $x^2+y^2=0$, qui représente un point ; et le paramètre a disparu. Il en faut conclure que les courbes n'ont qu'à peu près la forme de lemniscates ; elles s'en éloignent notablement quand les axes sont très écartés, et il faudrait, pour obtenir des lemniscates, projeter les courbes sur une sphère ayant son centre sur la pupille. Dans ce cas, on peut, avec l'appareil Soleil, observer successivement les deux systèmes d'anneaux, en plaçant le plan des axes verticalement et inclinant plus ou moins la lame au moyen de la pince qui la soutient. On peut encore rapprocher les systèmes d'anneaux, en collant sur les faces opposées de la lame, des prismes de même angle réfringent.

2441. Détermination des axes. — C'est par la forme des courbes et des bandes noires qui les croisent, qu'on reconnaît le plus facilement les

cristaux à deux axes. Pour trouver la position du plan des axes optiques, on taille dans le cristal une lame à faces parallèles, on la place entre un polarisateur et un polariscope tournés à l'obscurité, et l'on fait tourner la lame sur elle-même jusqu'à ce que sa présence n'amène aucune lumière. On trouve ainsi deux positions, pour lesquelles on marque sur la lame, les traces du plan primitif de polarisation. Ces deux traces forment un angle de 90°, et l'une d'elles se trouve dans le plan des axes. On tourne ensuite la lame dans son plan, de manière que chacune des traces fasse un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, puis on cherche, en l'inclinant successivement autour de ces traces, à apercevoir les anneaux autour des axes. Le plan des axes est perpendiculaire à la ligne autour de laquelle on a fait tourner la lame pour voir les anneaux.

Mesure de l'angle des axes. — L'angle des axes se mesure facilement avec l'appareil de M. Soleil (*fig.* 1738). La lame étant taillée à peu près perpendiculairement à la ligne moyenne, on la fixe dans la pince *c*, de manière que le plan des axes soit vertical, et l'on fait tourner la pince sur elle-même, de manière à faire coïncider successivement les *pôles* des deux systèmes d'anneaux avec le point de croisement des fils du micromètre. La quantité angulaire dont on tourne le prisme, donne l'angle apparent des axes. Il reste, pour avoir leur angle réel, à tenir compte de la réfraction, en appliquant les lois de Descartes, qui se vérifient dans les sections principales (2331).

On reconnaît, par ce moyen, que l'angle des axes est différent pour les divers rayons simples, comme l'avait découvert M. Herschel. Ce résultat, qui trouble l'ordre des couleurs dans les anneaux, peut aussi se constater sans faire de mesures précises, en projetant sur un écran les lemniscates formées autour des deux axes, et interposant successivement des verres de différentes couleurs; on voit les foyers des courbes changer de position : tantôt l'angle des axes diminue quand la réfrangibilité des rayons augmente, comme pour le carbonate de plomb; tantôt il augmente, comme pour le nitre, et surtout le tartrate de potasse et de soude (sel de la Rochelle), pour lequel l'angle des axes est de 76° dans la lumière rouge, et de 56° seulement dans la lumière violette; les anneaux rouges sont plus grands que les violets. D'après M. Brewster, la glaubérite présente deux axes, inclinés de près de 5°, dans la lumière rouge, et un seul axe dans la lumière violette.

En général, le plan des axes et la ligne moyenne restent les mêmes pour toutes les couleurs. Cependant M. Norremberg a vu certains cristaux, par exemple le gypse, donner des axes qui ne sont pas dans le même plan, et même, avec le nitrate de mercure, la ligne moyenne changer de position avec les couleurs. Chez le borax, les axes se déplacent, de manière que les pôles dans les différentes couleurs sont situés sur des droites parallèles. Ces anomalies, bien difficiles à concevoir théoriquement, ne proviendraient-elles pas de quelques irrégularités de structure dans les cristaux employés?

2442. La formation des courbes autour des axes des cristaux à deux

axes se rattache à la même théorie que les anneaux formés dans les cristaux à un axe. Il est facile de concevoir comment l'obliquité des rayons convergents détermine des variations d'intensité qui donnent lieu aux anneaux, et comment l'inégalité de distance des molécules suivant deux directions rectangulaires dans le plan perpendiculaire à la ligne moyenne, donne lieu à des courbes fermées de forme allongée, ayant deux pôles correspondants aux axes. Mais quand on veut circonstancier les différents détails du phénoméne, les calculs se compliquent beaucoup; nous nous contenterons donc de ces courtes indications. La complication est encore plus grande pour les phénoménes qui suivent; aussi ne ferons-nous que les décrire.

III. Franges de formes diverses. — Dichroïsme, etc.

2443. Franges hyperboliques des lames parallèles à l'axe. — Quand on projette sur un plan, les lemniscates d'une lame perpendiculaire à la ligne moyenne d'un cristal à deux axes, on voit ces courbes se rapprocher, prés du centre, de la forme de branches d'hyberbole, à mesure que l'angle des axes augmente; et, si l'on suppose que cet angle devient égal à 180°, ce qui revient à dire que le cristal est à un axe et que la lame est taillée parallèlement à cet axe, on observe avec la lumière monochromatique polarisée, deux systèmes de franges hyperboliques ayant mêmes asymptotes, et dont un des axes coïncide avec celui du cristal. Les hyperboles conservent leur forme, quand on fait tourner la lame, et tournent avec elle en variant d'éclat. Cet éclat est maximum quand l'axe fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation. Ces courbes ne sont distinctes, avec la lumière blanche, qu'autant que la lame est trés mince, mais alors l'axe transverse est tellement long, qu'il est difficile de les apercevoir. Quand on peut y parvenir, on remarque que les couleurs sont disposées en ordre inverse dans les deux angles des asymptotes, ce qui provient de ce que les différences de marche croissent en s'approchant du centre pour une des séries de courbes, et diminuent, pour l'autre. M. Delezenne a fait beaucoup d'observations sur ce sujet. Il montre que, si l'épaisseur de la lame est telle qu'une des hyperboles se confonde avec ses asymptotes, les carrés des axes de ces courbes croissent comme les nombres 0, 1, 2, 3..., et que ces carrés sont proportionnels à la longueur de l'onde, en raison inverse de la différence des indices ordinaire et extraordinaire, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame.

2444. Lames superposées parallèles à l'axe. — Quand deux parties séparées d'une même lame parallèle à l'axe sont superposées de manière que ces axes soient perpendiculaires, on aperçoit avec la lumière convergente, deux systèmes d'hyperboles équilatères (*fig.* 1743), dont les asymptotes sont formées par une croix noire quand le polariscope est tourné à l'obscurité, et par

une croix blanche quand on le fait tourner ensuite de 90°, et les teintes sont complémentaires de ce qu'elles étaient. Si l'on fait tourner le système des lames sur lui-même, les hyperboles tournent dans le même sens en conservant leur forme. L'éclat seul change ; il est maximum quand une des asymptotes est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et la lumière disparaît quand elle est inclinée de 45° sur ce plan. Des lames de quartz de 5 à 6^{mm} d'épaisseur conviennent bien pour l'observation de ces phénomènes.

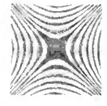


Fig. 1743.

2445. Lames superposées, à axes obliques aux rayons. — Nous allons examiner quelques cas dans lesquels les axes des lames ne sont plus perpendiculaires à la direction générale des rayons.

1° Expérience des quartz croisés. — Supposons deux lames de cristal de roche perpendiculaires à l'axe, recevant de la lumière polarisée, qui converge dans l'œil après qu'elle a traversé une tourmaline dont il est très rapproché ; les lames étant parallèles, on aperçoit des anneaux irisés, mais sans croix noire, particularité propre au quartz, et sur laquelle nous reviendrons (2482). Si l'on incline les lames de manière que leurs axes restent dans la section principale de la tourmaline, on aperçoit deux systèmes d'anneaux, qui s'écartent à mesure



Fig. 1744.

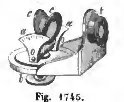


Fig. 1745.

que l'inclinaison augmente, et des franges irisées transversales à la ligne des centres, et disposées symétriquement entre ces points (*fig.* 1744). Ces franges sont contournées près des anneaux, qu'elles coupent en partie, et elles deviennent sensiblement rectilignes et équidistantes, quand l'angle des lames dépasse 30° ; elles sont alors à peine visibles près de la ligne des centres. On distingue une bande noire centrale entre deux bandes blanches, ou une bande blanche entre deux bandes noires, suivant que la tourmaline est tournée à l'obscurité, ou à 90° de cette position. Dans les positions intermédiaires, les franges changent de teintes, mais leurs contours restent les mêmes.

On voit (*fig.* 1745) le petit appareil qui sert à faire ces expériences. Les deux quartz *c*, *c* peuvent s'incliner autour d'un axe horizontal *oo*, de quantités mesurées sur des arcs gradués *a*, *a*, et on peut les faire tourner autour d'un axe vertical au moyen du bouton *b*, de manière à suivre les franges dans leurs parties latérales. En *t* est la tourmaline, pouvant tourner sur elle-même.

2° On taille dans un cristal de quartz, une lame de 4 à 5^{mm} d'épaisseur, prise parallélement à l'une des faces de la pyramide terminale du cristal naturel ; on coupe cette lame en deux parties, que l'on superpose de manière que les bords suivant lesquels a été faite la séparation, soient perpendiculaires l'un à l'autre. Ce système donne dans la pince à tourmaline, ou dans l'appareil (*fig.* 1745), des franges hyperboliques trés brillantes, dont on ne voit que les parties éloignées des sommets, de manière qu'elles paraissent rectilignes et parallèles. Quand les tourmalines sont croisées, on voit au milieu, une bande noire entre deux blanches suivies de bandes irisées. Quand les axes des tourmalines sont parallèles, on obtient les couleurs complémentaires, et l'on voit au milieu une bande blanche entre deux noires. Quand les axes des tourmalines font un angle de 45°, tout disparaît. Si l'on fait tourner le systéme des lames, les franges tournent avec lui ; elles ont leur maximum d'éclat quand elles sont parallèles ou perpendiculaires au plan primitif de polarisation ; alors les sections principales des lames forment un angle de 45° avec ce plan. Si l'on fait ensuite tourner les lames de 45°, les franges s'effacent.

2446. Polariscope de Savart. — Le système de quartz obliques dont nous venons de parler, appliqué dans un anneau métallique, sur une tourmaline dont l'axe fait un angle de 45° avec les sections principales des lames, forme le *polariscope de Savart*. En tournant le petit appareil jusqu'à ce qu'on obtienne le maximum d'éclat des franges, on découvrira le plan de polarisation des rayons incidents, plan qui sera perpendiculaire à l'axe de la tourmaline, s'il y a au milieu, une bande noire entre deux blanches, et sera parallèle à cet axe s'il y a une bande blanche entre deux noires. Ce polariscope composé est d'une exquise sensibilité, et il offre l'avantage d'indiquer directement la position du plan de polarisation ; aussi sert-il souvent à l'étude de la polarisation de l'atmosphère.

Les quartz obliques produisent avec la lumière de la lampe monochromatique, des phénomènes nouveaux invisibles avec la lumière blanche. C'est ainsi que, suivant la position relative des tourmalines, on distingue une foule de lignes formant comme des mailles ou des alvéoles. M. Delezenne a décrit avec soin ces apparences curieuses, dont l'aspect est très varié.

Le même physicien a étudié les franges qui se forment quand on superpose des lames donnant isolément des anneaux, des lemniscates, des hyperboles, ou des franges linéaires. Ces phénomènes sont très brillants, et il est facile de comprendre combien ils doivent être variés, et combien seraient compliqués les calculs au moyen desquels on tenterait d'en trouver l'explication circonstanciée.

2447. Dichroïsme des cristaux. — Certains cristaux colorés bi-réfringents, traversés par la lumière blanche *naturelle*, présentent des couleurs différentes suivant la direction des rayons par rapport à leur axe ; c'est ce qui constitue le *dichroïsme des cristaux*. Par exemple, quand les rayons passent parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, l'*iolithe* ou *dichroïte* est d'un

blanc jaunâtre tirant sur le brun, ou d'un beau bleu azuré ; le chlorure de potassium et de palladium est rouge foncé, ou d'un beau vert ; quelques variétés de saphir sont bleues, ou vert jaunâtre ; l'idocrase est jaune orangé, ou vert jaunâtre ; le sous-oxysulfate de fer est rouge-sang foncé, ou vert. Quelques tourmalines vertes sont rouge brun foncé suivant l'axe.

Absorption de la lumière par les cristaux. — C'est à M. Brewster que nous devons presque tout ce que nous savons sur le dichroïsme des cristaux. Pour expliquer ce phénomène, on le rattache à la propriété qu'ont les milieux bi-réfringents d'absorber les rayons polarisés, en différentes proportions suivant leur direction par rapport aux axes. Nous avons vu de fréquents exemples de cette variation dans l'absorption, et la théorie permet de la concevoir facilement. C'est ainsi qu'une lame de tourmaline absorbe complètement un rayon polarisé dans un plan parallèle à son axe, et le laisse passer en proportion plus ou moins grande quand on incline cet axe par rapport au plan de polarisation. Ici, les rayons simples qui composent le faisceau blanc incident, sont absorbés en mêmes proportions ; de manière que la lumière reste toujours de même teinte. Mais quand les coefficients d'absorption des divers rayons simples varient dans des rapports différents avec les changements de direction dans le cristal, la nuance formée par le mélange des rayons non absorbés change également. Or, ces variations différentes des coefficients d'absorption s'observent directement quand on opère sur de la lumière simple traversant normalement des lames de même épaisseur, taillées parallèlement, et perpendiculairement à l'axe de certains cristaux.

Explication. — Cela posé, quand des rayons pénètrent dans un cristal bi-réfringent normalement à une des faces, ils se divisent en général en deux rayons polarisés à angle droit, et ces rayons, continuant à cheminer dans le cristal, y subissent une absorption qui varie suivant leur direction par rapport aux axes optiques, et suivant leur longueur d'ondulation. Si l'absorption varie dans le même rapport pour toutes les couleurs simples, il n'y a pas dichroïsme ; c'est ce qui a lieu pour la plupart des tourmalines vertes. Si l'absorption est inégale, le dichroïsme se manifeste.

Trichroïsme. — La théorie indique la possibilité du *trichroïsme* dans les cristaux à deux axes ; et, en effet, M. Soret l'a observé dans certaines topazes du Brésil, dont la teinte était rose un peu jaunâtre, dans la direction de la ligne moyenne ; violette, suivant la ligne complémentaire ; et d'un blanc jaunâtre, perpendiculairement au plan des axes.

2448. Absorption inégale des rayons ordinaire et extraordinaire. — M. Babinet a remarqué que, des deux rayons qui se séparent à l'entrée d'un milieu bi-réfringent à un axe, celui qui marche le moins vite est le plus absorbé. Ce sera donc le rayon ordinaire, dans les cristaux positifs, comme pour la tourmaline ; et le rayon extraordinaire, dans les cristaux négatifs, comme cela a lieu dans le cristal de roche enfumé.

Cette loi, vraie dans le plus grand nombre de cas, souffre cependant d'assez

nombreuses exceptions. Ainsi, M. Haidinger a trouvé que l'ordre des absorptions des deux rayons n'est pas le même dans les variétés jaune et bleue de béryl, qui sont toutes deux négatives. M. Beer a reconnu que le bichromate de potasse, la cyanite, certaines variétés de topaze font aussi exception ; que l'idocrase et l'acétate de cuivre suivent la loi pour les rayons bleus, et s'en écartent pour les rayons jaunes, orangés et rouges.

M. Hagen a étudié la question méthodiquement, en mesurant les coefficients d'absorption des divers rayons simples dans différentes directions d'un même cristal, par la méthode suivante [1] : un faisceau de lumière simple, polarisé par un prisme de Nicol, traverse un spath d'Islande, où il se bifurque en deux autres, qui traversent la lame de cristal, dont la section principale est parallèle à celle du spath. On fait tourner le plan de polarisation du faisceau incident jusqu'à ce que les deux images soient égales. Si o et e sont les proportions de la lumière non absorbée par la lame dans les rayons ordinaire et extraordinaire, α l'angle du plan de polarisation primitif avec la section principale du spath ou de la lame, on aura $o \cos^2 \alpha = e \sin^2 \alpha$; d'où $o : e = \text{tang}^2 \alpha$, pour le rapport des intensités des rayons simples. — La lumière venait d'un spectre bien pur, obtenu au moyen d'un mince pinceau de rayons solaires renvoyés par un héliostat et ayant traversé les fentes étroites de deux écrans éloignés. Une nouvelle fente placée devant le prisme de Nicol isolait une portion étroite du spectre. La lumière incidente était rendue diffuse par du papier huilé tendu sur un anneau qu'on faisait tourner pour détruire l'effet des inégalités du papier.

M. Hagen a d'abord vérifié la loi générale du décroissement des intensités en progression géométrique quand les épaisseurs croissent en progression arithmétique, en constatant que le rapport $o : e$ satisfait lui-même à cette loi. Il opérait sur une même lame, dont il modifiait successivement l'épaisseur en conservant une des faces, à laquelle il rendait l'autre bien parallèle. Il a ensuite cherché les changements que les variations de la longueur d'ondulation λ apportent au rapport $o : e$. Les expériences, faites avec le cyanoferrure rouge de potassium, la topaze enfumée, la cordiérite, la topaze jaune, la cyanite et diverses tourmalines, l'ont conduit aux résultats suivants :

1° Le rapport $o : e$ est une fonction continue de λ, présentant, dans chacun des cristaux observés, un maximum ou un minimum.

2° Les variations de $o : e$ sont égales de part et d'autre du maximum ou du minimum ; de manière que s'ils ont lieu pour la longueur particulière λ', les valeurs de $o : e$ seront égales pour $\lambda' + n$ et $\lambda' - n$.

3° La grandeur absolue du maximum et du minimum et leur position dépendent de la direction de la lame par rapport aux axes du cristal.

4° D'après la manière dont varie la fonction $o : e$, il est probable que,

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LVI, p. 367.

dans les cristaux qui font exception à la loi de M. Babinet, l'exception ne s'applique qu'à une partie des rayons du spectre.

2449. Houppes d'Haidinger. — Quand on reçoit de la lumière polarisée, directement dans l'œil, par exemple, la lumière du ciel ayant traversé un prisme de Nicol, on aperçoit une croix formée de quatre houppes, très diffuses à leurs extrémités, et souvent peu distinctes; les deux qui sont dirigées dans le plan de polarisation sont jaunes, tandis que les deux autres, beaucoup plus vagues, sont violettes. Ce phénoméne, découvert par M. Haidinger, permet de constater à l'œil nu si la lumiére est polarisée, surtout si l'on déplace les houppes en faisant tourner le polarisateur. Comme la lumière atmosphérique est le plus souvent polarisée, on pourra observer les houppes et trouver le plan de polarisation, sans le secours d'aucun instrument. Remarquons enfin que tous les yeux ne paraissent pas propres à l'observation de ces phénomènes.

M. Silbermann a cherché à expliquer les houppes, en supposant que la cornée et le cristallin sont bi-réfringents. La cornée et les parties antérieures du cristallin joueraient le rôle d'une lame mince cristallisée, et les parties postérieures feraient l'office de polariscope. A l'appui de cette théorie, M. Silbermann cite des expériences de M. Brewster, qui a obtenu des couleurs au moyen du cristallin de divers animaux, placé entre un polarisateur et un polariscope. Néanmoins, la théorie suivante, due à M. Jamin, nous semble beaucoup plus plausible[1].

Si l'on fait tourner une pile de glaces autour d'un rayon polarisé tombant obliquement, l'intensité du rayon émergent varie avec l'angle de la section principale de la pile et du plan de polarisation (2336). Si l'on forme une pile avec des lentilles superposées, tous les plans passant par l'axe commun de ces lentilles seront autant de sections principales, et un faisceau polarisé présentera, dans chacun de ces plans, une intensité dépendant de l'angle qu'il fait avec le plan de polarisation, comme cela a lieu avec le cône de M. Guérard (2343). Il y aura donc un maximum et un minimum ; le premier, perpendiculaire au plan de polarisation, formera deux houppes épanouies, brillantes; le second, paralléle à ce plan, formera deux houppes sombres. Un système de lentilles alternativement convergentes et divergentes, pour ne pas imprimer de déviation aux rayons, donne également ces houppes. — Cela posé, l'œil est composé de milieux superposés présentant la forme de lentilles, savoir : la cornée, l'humeur aqueuse et les couches du cristallin. Lors donc qu'il recevra de la lumiére polarisée, il produira par lui-même des houppes, qui se peindront sur la rétine.

2450. Astérie. — Des lames de certains cristaux taillées perpendiculairement à l'axe, peuvent présenter accidentellement, quand on les place entre l'œil et une vive lumière, une étoile blanchâtre, le plus souvent à six rayons.

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. XXVI, p. 197.

Ce phénomène, désigné sous le nom d'*astérie*, s'observe quelquefois par réflexion. Il ne se manifeste pas avec tous les cristaux d'une même espèce, mais particuliérement avec ceux dont la transparence est troublée par quelque défaut de structure. M. Babinet en a trouvé l'explication dans des stries régulières que présentent alors ces cristaux [1]. Par exemple, dans les prismes hexagonaux du saphir, ces stries sont paralléles aux trois directions des faces ; elles réflétent la lumière dans un plan qui leur est perpendiculaire, et par conséquent dans trois directions qui, en se croisant, forment une étoile à six rayons perpendiculaires au milieu des côtés de la section droite. Le corindon, le grenat présentent assez souvent l'astérie. L'œil-de-chat, composé de filaments d'asbeste dans une seule direction, donne une ligne astérique transversale aux filaments. Il en est de même de tous les cristaux fibreux, comme le gypse, le zircon, etc. On voit que ces phénoménes sont dûs à un jeu de lumiére analogue à celui qui produit les cercles parhéliques (2130).

§ 3. — APPLICATIONS DE LA POLARISATION CHROMATIQUE.

2451. Application à la cristallographie. — Indépendamment du secours précieux qu'apporte la polarisation chromatique à l'étude de la lumière polarisée, en lui fournissant les *polariscopes composés* d'Arago, de Savart, de M. Babinet, elle offre à la cristallographie des moyens précieux d'investigation ; car on peut reconnaître facilement, en employant les instruments que nous avons décrits, si un cristal appartient au système régulier, à l'un des deux systèmes symétriques autour d'un axe, ou à un de ceux qui ne présentent pas cette symétrie. On peut aussi trouver, au moyen des anneaux et des courbes isochromatiques, la position des axes, celle de leur plan, l'angle qu'ils font entre eux ; et, dans le cas de cristaux à un axe, reconnaître s'ils sont positifs ou négatifs. Parmi les moyens qui servent à ce dernier usage, nous rappellerons celui qu'ont imaginé MM. Moigno et Soleil (2333), et qui consiste à faire naître par compression deux axes, dont on reconnaît le plan par la position des pôles des lemniscates.

Dans beaucoup de cas, on n'a à sa disposition que des cristaux, ou fragments de cristaux, trop petits pour qu'on puisse les étudier avec les appareils que nous avons cités. On emploie alors avec avantage l'instrument que nous allons décrire, et qui peut servir à expérimenter soit dans la lumière paralléle, soit dans la lumière convergente.

2452. Microscope polarisant d'Amici. — Le corps *co* du microscope (*fig.* 1746) peut se déplacer le long du support de l'instrument, au moyen d'un pignon *n* dont les dents s'engagent dans celles d'une crémaillère fixe. Aux

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences*, t. IV, p. 762.

extrémités du corps *co*, sont adaptés un objectif *o*, *o*, et un oculaire *cv*, *cv* composé de deux verres, dans le système d'Huyghens (2199). Les grossissements sont de 12 à 55 diamètres, pour lesquels l'objet doit être placé à une distance de l'objectif allant jusqu'à 105mm et 16mm. Le cercle de Ramsden (2197) se forme assez loin de l'oculaire pour qu'on puisse interposer un spath d'Islande *p*, *p*. L'objet est remplacé par la lame cristallisée posée sur un disque de verre *s* pouvant tourner sur lui-même et autour d'un axe horizontal, de quantités mesurées par des limbes gradués. Ce cristal reçoit en dessous, des rayons polarisés énergiquement par réflexion multiple sur une pile de glace P inclinée à 35° sur les rayons incidents. Cette pile reçoit la lumière du soleil, des nuées ou d'une lampe, renvoyée par un miroir de glace *m* articulé sur son support. De chaque point du cristal partent deux rayons séparés par la double réfraction, mais suivant la même direction et ayant partout la même différence de marche, à cause de la petite étendue du champ comparativement à la distance du cristal à l'objectif. Le spath *p* donne deux images du cercle de Ramsden. Un écran à deux trous pouvant se fermer à volonté, permet de n'en observer qu'une, ou d'observer presque simultanément, par un léger déplacement de l'œil, les deux images complémentaires.

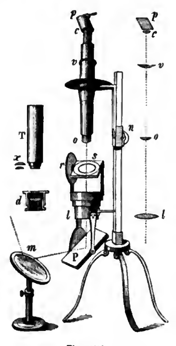


Fig. 1716.

Quand on veut expérimenter dans la lumière convergente, on adapte au-dessous du porte-objet, un système de lentilles *d*, qui rassemble en un foyer très rapproché, les rayons parallèles venant de la pile de glace. Les rayons croisés à ce foyer tombent ensuite en divergeant sur la lame, qu'ils traversent plus ou moins obliquement. Comme la petitesse de l'objectif ne permettrait d'admettre dans l'instrument qu'une très petite partie de ces rayons, on adapte au corps du microscope un tube auxiliaire T muni de deux lentilles *x*, qui forme une image de la lame assez petite et assez rapprochée de l'objectif *o*, pour que les rayons qui partent de cette image ne sortent pas du champ. On peut ainsi observer des anneaux avec les plus petits fragments des cristaux, et reconnaître si ces cristaux sont à un axe ou à deux axes, ou s'ils appartiennent au système régulier, auquel cas il ne se produit pas de couleurs.

2453. Application à l'étude de l'isomorphisme. — M. de Sénarmont s'est proposé de comparer les propriétés optiques des cristaux *isomorphes*, pour

savoir jusqu'à quel point ces propriétés restent les mêmes, quand il en est ainsi de la forme géométrique et de la constitution chimique [1]. Il fait remarquer d'abord que, s'il est facile de concevoir que des éléments ayant des tendances chimiques semblables, et unis dans les mêmes proportions, cristallisent sous une même forme, qui semble dépendre plutôt de l'arrangement des molécules que de leur nature, il y a cependant des cas où l'isomorphisme chimique et géométrique réalisés dans certains composés, ne le sont plus dans d'autres formés des mêmes éléments. D'autres fois, des composés isomorphes chimiquement et géométriquement refusent de s'unir par cristallisation, à cause d'une dissemblance moléculaire, attestée seulement par certains caractères optiques et par des particularités de forme qu'on pourrait croire accidentelles. Il était donc important de comparer les propriétés bi-réfringentes des cristaux isomorphes; c'est ce qu'a fait M. de Sénarmont. Mais il ne suffisait pas d'étudier les phénomènes optiques qui peuvent s'observer dans le microscope polarisant; il fallait encore, autant qu'il était possible, trouver les indices principaux et les directions des axes, par des procédés variant suivant les espèces, et dont le détail nous entraînerait trop loin. Voici les résultats les plus importants auxquels ont conduit ces savantes recherches :

1° Dans un grand nombre de groupes de substances, isomorphes géométriquement et chimiquement, les propriétés optiques sont semblables au même degré. Les écarts n'étaient pas plus grands que ceux que comporte l'isomorphisme géométrique; ce qui ne doit pas étonner, à cause de la différence de nature qui accompagne l'identité presque complète de structure. — Il faut citer, parmi les cristaux isomorphes *à un axe*, les *biphosphates* et *biarséniates de potasse et d'ammoniaque*; les *chlorures doubles de cuivre et de potassium*, de *cuivre et d'ammonium*, qui cristallisent en prismes droits à base carrée. — Parmi les cristaux *à deux axes* cristallisant en prisme droit à base rhombe, les *sulfates de zinc* et de *magnésie*, le *chromate de magnésie*, les *sulfates de baryte*, de *strontiane*, de *plomb*. — Dans le système prismatique oblique, les *phosphates* et *arséniates neutres de soude*, et surtout « le groupe nombreux des sels doubles formés par l'union des *sulfates de potasse* et d'*ammoniaque* avec presque tous les oxydes de la famille magnésienne. La presque identité de propriétés optiques est surtout remarquable dans ces derniers sels, réductibles au prisme oblique symétrique. Non seulement, en effet, les valeurs des trois élasticités principales conservent à peu près le même rapport, mais les axes d'élasticité homologues ont presque la même direction dans le cristal, et cependant cette direction n'est pas ici une conséquence forcée de la symétrie géométrique. »

2° Il y a des sels qui, ayant des propriétés optiques identiques, ne sont cependant isomorphes ni géométriquement, ni chimiquement; car ils peuvent se combiner avec dégagement de chaleur, pour former des composés différant

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIII, p. 391.

de chacun d'eux par leur cristallisation et leurs propriétés chimiques. Tels sont les *levotartrates* et les *dextrotartrates d'ammoniaque*, de *soude et d'ammoniaque*, de *soude et de potasse*; les acides *levotartrique* et *dextrotartrique*.

3° Il y a des sels parfaitement isomorphes par l'identité de leur forme géométrique, par leur composition chimique, leur aptitude à s'allier au cristallisant, et qui cependant présentent des propriétés optiques tout opposées. Par exemple, dans les groupes formés l'un du *spath calcaire*, de l'*azotate de soude* et du *sulfate de potasse*, l'autre des *hyposulfates de chaux*, de *strontiane*, de *plomb*, l'axe optique donne la direction du plus grand axe d'élasticité chez les deux premiers sels, et la direction du plus petit axe chez le dernier sel de chaque groupe; ou, en d'autres termes, les deux premiers sont négatifs, et le dernier positif. — Dans les cristaux à deux axes, le *chromate* et le *sulfate de potasse* ont leur axe d'élasticité moyenne situé de la même manière; mais dans le premier, la ligne moyenne donne la direction du plus grand axe d'élasticité, et celle du plus petit axe, dans le dernier. Dans le groupe de l'*aragonite*, du *plomb carbonaté* et de l'*azotate de potasse*, la ligne moyenne est l'axe de plus grande élasticité; mais dans les deux premiers, les axes de plus petite et de moyenne élasticité sont situés dans des plans différents perpendiculaires l'un à l'autre. L'azotate de potasse se rapproche de l'aragonite. Les *tartrates de soude et de potasse* (sel de seignette), de *soude et d'ammoniaque*, présentent des différences analogues; de plus, les axes optiques, différents pour les diverses couleurs, et également écartés les uns des autres pour les deux sels, sont situés dans des plans diamétraux rectangulaires.

Il résulte de ces faits que l'élasticité de l'éther présente, dans certaines substances isomorphes, une inversion complète de grandeur relative, ce qui indique dans la valeur de la résultante des actions moléculaires qui modifient cette élasticité, une inversion semblable, pendant que l'enveloppe géométrique reste presque identiquement la même. Les causes déterminantes de la forme géométrique sont donc d'un autre ordre que celles qui président aux propriétés optiques; une même cause ne pouvant se manifester en même temps par des effets géométriques semblables et par des effets optiques opposés.

Mélanges de substances isomorphes. — L'opposition entre les propriétés optiques sous la même forme extérieure est confirmée par les expériences qu'a faites M. de Sénarmont sur les cristaux obtenus par le mélange de substances isomorphes. Ayant fait cristalliser de l'*hyposulfate de strontiane*, qui est négatif, avec des mélanges d'*hyposulfate de plomb*, qui est positif, il vit les anneaux autour de l'axe s'étendre à mesure que la proportion du second sel augmentait, puis être remplacés par une teinte violette uniforme coupée d'une croix noire, ce qui indique que les actions inverses des deux substances se contrebalançaient et faisaient disparaître la double réfraction. Les anneaux reparaissaient ensuite en se resserrant de plus en plus. — Si l'on fait cristalliser le sel de seignette mélangé avec des proportions croissantes de *tartrate double de soude et d'ammoniaque*, dont le plan des axes optiques est dirigé

perpendiculairement à celui du premier sel, l'angle des axes diminue, en même temps que les axes qui correspondent à la lumière rouge se rapprochent de ceux de la lumière violette, placés en dedans des premiers. Les axes de ces deux couleurs finissent par se confondre, et alors les courbes isochromatiques sont nettes et régulières. Les axes rouges passent ensuite en dedans des axes violets, et se réunissent en un seul, de manière que le cristal est à un axe pour les rayons rouges. Ces axes se séparent ensuite, mais dans un plan perpendiculaire à leur plan primitif, de manière que les axes violets et les axes rouges se trouvent dans des plans rectangulaires, et que le cristal est à un axe pour une des couleurs intermédiaires. Les axes de toutes couleurs se réunissent enfin dans le plan des axes rouges, l'influence du sel ammoniacal l'emportant alors sur celle du premier sel. — Nous avons vu (1333) comment ces variations des angles des axes dans les substances isomorphes mélangées, ont conduit M. de Sénarmont à l'explication des différences que présentent ces angles dans diverses substances minérales, comme la *topaze*, et les micas.

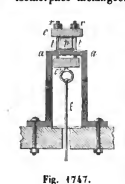


Fig. 1747.

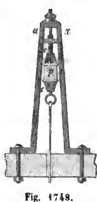


Fig. 1748.

2454. Application à l'étude de l'élasticité. — Nous savons que la compression fait naître des couleurs dans une masse de verre traversée par la lumière polarisée (2430). Ces couleurs sont en rapport avec l'élasticité développée ; Wertheim a tiré parti de ces phénomènes pour étudier, par un nouveau moyen, les lois de l'élasticité, et comparer les effets optiques, aux actions qui la développent[1].

La *figure* 1747 représente la presse à poids qui a servi à ces expériences. *p* est la pièce transparente à comprimer ; elle est appuyée sur un support en bronze *aa*, et supporte une plaque métallique *c*, tirée par deux tiges *t*, *t* passant, à frottement doux, par deux trous pratiqués dans le support *aa*. Ces tiges sont réunies en dessous par une autre plaque *c'*, à laquelle on suspend par la tringle *f*, une caisse munie de vis calantes, destinée à recevoir des poids. Les plaques *c*, *c'* sont garnies de caoutchouc et de carton, pour rendre la pression bien régulière ; ce qu'on reconnaît à l'uniformité de la nuance qui se manifeste avec la lumière polarisée S'il n'en était pas ainsi, on agirait sur un des écrous *r*, *r*, jusqu'à ce que cela ait lieu.

La *figure* 1748 représente l'appareil qui sert pour les tractions. Le parallélipipède transparent *p* est fixé, au mastic rouge, sur les bases de deux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XL, p. 156.

cônes *c*, *c*, dont un est soutenu par le support *a*, *a*, tandis que l'autre porte la charge.

Les supports *aa* (*fig.* 1747 et 1748) sont fixés sur un établi, entre un prisme de Nicol servant de polarisateur, et un analyseur bi-réfringent.

Cet appareil permet d'étudier, par les effets optiques, l'élasticité, sur des masses assez petites pour qu'on soit certain de leur homogénéité, et aussi sur des cristaux du système régulier. La sensibilité du procédé est telle, qu'une surcharge de 1 kilogr. suffit pour déterminer un changement de teintes, sur un cube de verre de 500 millimétres carrés de base. Supposons, pour plus de sûreté, qu'il faille 2 kilogr ; on voit qu'une charge de 4 grammes par *millimètre carré* produirait un effet sensible et mesurable, tandis que l'allongement ou le raccourcissement correspondants seraient moindres que $\frac{1}{1\,000\,000}$ de la hauteur, en supposant le coefficient d'élasticité égal à 5000.

Couleurs successives. — Quand on augmente peu à peu la charge, on obtient une suite de teintes plates, dont Wertheim a formé le tableau, en les mettant en regard de la charge qui leur correspond et de l'épaisseur de la lame mince d'air capable de les donner, d'après Newton.

Parmi ces teintes, il faut remarquer la *teinte sensible* violet-bleuâtre (2417), qu'une trés petite différence de charge, $\frac{1}{500}$, suffit pour modifier notablement.

Pour comparer les charges aux différences de marche exprimées en longueur d'ondulation, on emploie la lampe monochromatique, dont la lumiére donne une couleur orange voisine de la raie D de Fraunhofer, et pour laquelle on a $\frac{1}{2}\lambda = 294{,}5$ millioniémes de millimètre. Les deux prismes bi-réfrigents de l'appareil ayant leurs sections principales paralléles et inclinées de 45° sur la direction de la charge, il y a extinction de l'image ordinaire toutes les fois que la différence de marche est un multiple impair de $\frac{1}{2}\lambda$, et de l'image extraordinaire, quand ce multiple est pair. Remarquons que la lampe monochromatique donne un peu de violet, que l'on distingue quand il y a extinction.

Quand la charge agit par traction, elle doit être modérée, parce que le mastic cède assez facilement. Il en est de même pour beaucoup de sels, quand on les comprime, autrement ils se fendillent dans un sens, en produisant la *polarisation lamellaire*, signalée par Biot dans certains cristaux du système régulier, et qui semble tenir à une structure accidentelle en lamelles superposées. Mais alors les nombres que l'on compare sont trop petits pour qu'on obtienne une grande exactitude. Pour lever cette difficulté, Wertheim place prés du corps à étudier, une pièce de verre chargée de manière à donner la teinte sensible. Cette teinte est modifiée quand on regarde à travers les deux piéces, dont la seconde reçoit la faible charge qu'elle peut supporter. On modifie alors la charge du cube de verre, de manière à rétablir la teinte sensible. La charge enlevée ou ajoutée, représente l'équivalent de celle qui agit sur l'autre pièce. On peut rendre cette charge très grande, en donnant à la pièce de verre une grande section transversale.

Voici les principaux résultats trouvés par Wertheim : Les poids nécessaires

pour produire une certaine différence de marche sont : 1° indépendants de la hauteur du parallélipipède, 2° indépendants de sa longueur comptée dans la direction des rayons lumineux, l'étendue du trajet compensant le plus faible rapprochement des molécules ; 3° proportionnels à la largeur, 4° proportionnels à l'allongement ou au raccourcissement mécanique.

Ces lois ont été trouvées avec différents crowns et flints, avec l'alun, le sel gemme, le spath fluor et le borosilicate de plomb.

Enfin, Wertheim a démontré la loi de l'égalité du raccourcissement à l'allongement produit par des charges égales (I,425). Dès que la charge est assez forte pour que les anomalies dans la proportionnalité des changements de longueur aux charges disparaissent, il y a égalité de nuance sous l'influence de la même charge agissant par traction ou par compression.

2455. Dynamomètre chromatique. — Cet appareil consiste en un parallélipipède en verre, maintenu entre deux plaques d'acier garnies de bandes de caoutchouc et de carton, et dont une soutient des tubes noircis portant un polarisateur et un polariscope. Ce systéme étant engagé entre deux corps comprimés, on obtient une certaine teinte, d'où l'on déduit la compression produite, en consultant une table donnant les charges en poids, capables de produire les différentes teintes successives. — Le *dynamomètre chromatique* peut servir à mesurer l'effet des presses, étaux, balanciers, machines auxquelles on ne peut appliquer les dynamométres ordinaires. En comparant l'effet calculé d'une presse hydraulique, à l'effet mesuré au moyen de ce dynamométre, Wertheim a reconnu que les frottements des pistons font perdre une partie de l'effort, qui est loin d'être négligeable.

CHAPITRE XII.

POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE.

§ 1. — CARACTÈRES ET ORIGINE DE LA POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE.

2456. Nous avons vu que la lumière polarisée, après avoir traversé une lame bi-réfringente, n'est, en général, ni polarisée dans un plan, ni à l'état neutre (2416) ; car cette lumière jouit de la propriété de ne pas s'éteindre complétement en traversant un polariscope, quelle que soit l'orientation de celui-ci, et en même temps elle présente, quand la lame est suffisamment

mince, des couleurs que la lumière naturelle ne produit pas dans les mêmes conditions.

La lumière qui a éprouvé la réflexion totale dans une substance transparente, celle qui a été réfléchie par les métaux, et même par la plupart des substances non métalliques, présente aussi des propriétés qui montrent qu'elle n'est ni naturelle ni polarisée dans un plan. Quel est donc l'état de cette lumière, et dans quelles directions les vibrations s'y accomplissent-elles? Fresnel a répondu à ces questions par la théorie de la *polarisation circulaire et elliptique*, qui va nous occuper.

2457. Définition de la lumière polarisée circulairement. — Quand un faisceau de rayons lumineux vu à travers un analyseur présente la même intensité dans tous les azimuts, comme la lumière naturelle, et que, en même temps ce faisceau se colore quand on interpose une lame cristallisée, ce qui n'a pas lieu pour la lumière naturelle, il est dit *polarisé circulairement*. Il est à remarquer que la couleur donnée avec la lame mince est différente de celle que fournirait un rayon *polarisé dans un plan*.

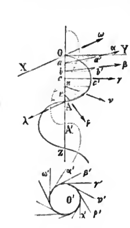
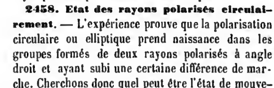


Fig. 1749.

Polarisation elliptique. — Quand un faisceau présente des intensités maximum et minimum dans deux positions rectangulaires de l'analyseur, comme la lumière partiellement polarisée dans un plan, et que, en même temps, il se colore par l'interposition d'une lame cristallisée, il est dit avoir reçu la *polarisation elliptique*. Les nuances qu'il donne à travers la lame diffèrent de celles que donnerait un rayon polarisé partiellement dans un plan.



2458. Etat des rayons polarisés circulairement. — L'expérience prouve que la polarisation circulaire ou elliptique prend naissance dans les groupes formés de deux rayons polarisés à angle droit et ayant subi une certaine différence de marche. Cherchons donc quel peut être l'état de mouvement des molécules d'éther dans un semblable groupe. Soit OZ (*fig.* 1749) la direction commune des deux rayons verticaux de même longueur d'ondulation, et polarisés, l'un dans le plan XOZ, l'autre dans le plan YOZ perpendiculaire au premier. Représentons par les ordonnées horizontales d'une courbe sinueuse, les vitesses qui animent les molécules d'éther à un instant donné, dans ces deux rayons. Ces courbes seront situées, l'une dans le plan XOZ, l'autre dans le plan YOZ. Supposons que le rayon polarisé dans le plan XOZ soit en retard sur l'autre, de $\frac{1}{4}\lambda$; alors le point *c* se trouve au milieu de l'espace OA. Au point O, la molécule d'éther est animée, dans le plan ZOX, d'une vitesse représentée par l'ordonnée de la courbe dirigée suivant Oω. Au point *a*, la molécule d'éther reçoit une vitesse qui est la résultante *aa'* des

vitesses représentées par les ordonnées des deux courbes, partant du point a; en b, cette vitesse est représentée par la résultante bb'; et en c, par cc', paralléle à OY. En n et en r, elle est dirigée suivant $n\nu$ et $r\rho$, et en A, suivant $A\lambda$ paralléle à OX. Dans les points intermédiaires à ceux que nous avons considérés, les directions des vitesses sont aussi intermédiaires aux directions α, β, γ, ν, ρ, λ; et l'on voit que ces directions auront tourné de 180°, dans l'espace $OA = \frac{1}{2}\lambda$; et, par conséquent, de 360°, dans l'espace $OZ = \lambda$. Les différentes directions des vitesses forment donc les génératrices d'un *héliçoïde* ayant pour axe OZ.

On démontre par l'analyse, que toutes ces vitesses sont égales, quand la différence de marche est égale à $\frac{1}{4}\lambda$, et quand les deux rayons ont la même intensité. Il en résulte que les molécules distribuées dans l'espace OZ se trouvent situées au même instant sur une hélice dont le pas est λ.

Mouvement d'une molécule. — Considérons maintenant une même molécule O, à différentes époques; elle recevra pendant la progression du système d'ondes représenté par la figure, les vitesses successives aa', bb', cc'... Soit donc O' la projection sur un plan horizontal, de la molécule considérée; elle marchera d'abord suivant ω' paralléle à ω, puis sera sollicitée suivant α' paralléle à $a\alpha$; suivant β' paralléle à $b\beta$;.... Les changements de directions se succédant d'une manière continue, et les vitesses étant constantes, la particule d'éther décrira pendant la durée d'une ondulation, une circonférence paralléle à la surface de l'onde. Le diamètre de cette circonférence dépend de l'intensité des deux rayons, ou de l'amplitude de leurs vibrations, et il est excessivement petit, comme cette amplitude.

Toutes les molécules du rayon OZ tournant avec la même vitesse, on pourra se représenter l'état de mouvement de l'ensemble, en supposant que l'hélice sur laquelle elles sont distribuées, tourne autour de son axe, et fait un tour entier pendant que la lumière parcourt l'espace λ. On voit que les choses se passent comme si, le rayon étant polarisé dans un plan, ce plan tournait, en faisant un tour entier pendant le temps d'une vibration.

Il est évident que les résultats resteraient les mêmes si, au lieu d'une différence de marche de $\frac{1}{4}\lambda$, il en existait une d'un nombre *impair* de fois $\frac{1}{4}\lambda$. Si le nombre était *pair*, les nœuds de vibration des deux rayons coïncideraient, et toutes les résultantes des vitesses seraient dirigées dans un même plan, qui serait le nouveau plan de polarisation rectiligne.

2459. État des rayons dans la polarisation elliptique. — Si les deux rayons polarisés à angle droit ne sont pas de même intensité, la courbe décrite par chaque molécule d'éther n'est plus une circonférence, mais une *ellipse*; et comme les vitesses résultantes reprennent périodiquement les mêmes valeurs, cette ellipse aura son grand axe dans une direction constante, de sorte que les molécules successives seront distribuées sur une courbe héliçoïdale tracée sur un cylindre à base elliptique. Le calcul démontre que la vitesse de chaque molécule varie aux divers points de la courbe qu'elle décrit.

La différence entre les axes de l'ellipse est d'autant plus grande que les intensités des rayons diffèrent davantage, et la direction du grand axe se rapproche d'autant plus du plan du rayon le plus intense, ou du plan de polarisation du plus faible, que la différence est plus grande. Si la différence est nulle, l'ellipse devient une circonférence. Si l'un des rayons a une intensité nulle, l'autre conserve la polarisation rectiligne. On voit donc que cette dernière polarisation et la polarisation circulaire ne sont que des cas particuliers de la polarisation elliptique.

La polarisation *elliptique* se produit encore avec deux rayons d'*intensité égale* polarisés à angle droit, quand la différence de marche n'est pas d'un nombre *impair* exact de fois $\frac{1}{4}\lambda$, et les deux axes de l'ellipse diffèrent d'autant plus, que la différence de marche s'approche davantage d'un nombre pair de fois $\frac{1}{4}\lambda$, limite à laquelle la polarisation devient rectiligne. — Nous trouvons une représentation matérielle des mouvements de la molécule d'éther, dans les courbes produites, suivant la méthode de M. Lissajous, par deux diapasons à l'*unisson* vibrant dans des plans rectangulaires : la ligne lumineuse est une droite, une ellipse ou une circonférence, suivant la différence de phase des vibrations (I,566).

2460. Sens du mouvement giratoire. — Pour trouver le sens du mouvement de la molécule d'éther sur la courbe qu'elle décrit, considérons l'angle diédre YOZX (*fig.* 1749) placé en avant, et deux portions de courbes $Oc'a$ et cA' placées également dans les parties antérieures des plans de polarisation YOZ, XOZ. Supposons d'abord que les nœuds des deux courbes coïncident, c'est-à-dire que A se confonde avec A', et c avec O, et qu'ensuite on fasse avancer de $\frac{1}{4}\lambda$, l'onde du plan YOZ, comme dans la figure ; le mouvement se fera de gauche à droite en avant, et les molécules d'éther seront distribuées sur une hélice *dextrorsum*. Si, au contraire, on retardait le rayon de gauche, de $\frac{1}{4}\lambda$, on reconnaîtrait facilement, en cherchant comme ci-dessus les directions des vitesses aux différents points du rayon OZ, que l'hélice serait *sinistrorsum*, et que le mouvement d'une même molécule aurait lieu de droite à gauche en avant.

2461. Propriété des rayons possédant la polarisation circulaire ou elliptique. — Du mouvement giratoire qui anime les molécules d'éther, découlent les caractéres qui nous ont servi à définir la polarisation circulaire et elliptique (2457). 1° Si l'on fait tomber obliquement sur un miroir, un rayon *polarisé circulairement*, l'intensité du rayon réfléchi sera indépendante de l'azimut de réflexion ; car il se présentera à la surface du miroir et dans un temps imperceptible θ, des molécules d'éther animées de vitesse prenant successivement toutes les directions ; comme cela a lieu pour un rayon naturel. Seulement, ici, ce temps θ est déterminé, et égal à celui que met la molécule à faire un tour entier. Ce résultat pouvait aussi se conclure de l'identité d'état du rayon tout autour de son axe. — 2° Si le rayon tombe sur un polariscope bi-réfringent, chacune des vitesses que possède la molécule dans les directions

successives, se décomposant en deux autres parallèles et perpendiculaires à la section principale, ces composantes passeront, dans le temps θ, par toutes les valeurs, depuis 0 jusqu'à 1, de manière que les deux images auront la même intensité constante. — 3° Un faisceau polarisé circulairement donne des couleurs avec les lames cristallisées. Remarquons d'abord que, si un rayon polarisé dans un plan donne deux images de couleur complémentaire quand on le fait passer à travers une lame cristallisée et un prisme bi-réfringent, un autre rayon polarisé en sens inverse donnerait aussi deux images de mêmes couleurs que les deux premières, mais dans une position inverse; de manière que les images superposées deux à deux formeraient deux images blanches. Cela suppose que les deux rayons primitifs polarisés à angle droit, étaient en coïncidence de marche en arrivant à la lame. S'il y avait un retard préalable entre ces deux rayons, les couleurs complémentaires ne seraient pas les mêmes dans ces deux couples d'images, et les deux images définitives seraient colorées. Cela posé, nous pouvons remplacer le rayon polarisé circulairement, par les deux rayons polarisés dans des plans perpendiculaires qui l'ont engendré, et ces deux rayons se trouvent précisément dans le cas que nous venons de supposer. Ils fourniront donc des couleurs à travers une lame cristallisée et un analyseur; et l'on voit que ces couleurs seront différentes de celles que donnerait un seul rayon polarisé dans un plan, puisque le retard n'est plus le même, étant modifié de $\frac{1}{4}\lambda$.

Ce que nous venons de dire s'applique à la polarisation elliptique; mais dans ce cas, les rayons n'ont plus une intensité constante quand ils sortent d'un analyseur qui les a reçus directement, les vitesses de la molécule d'éther aux différents points de l'ellipse n'étant plus constantes; et le rayon se comportera, quant aux intensités, comme un rayon polarisé partiellement dans un plan qui serait perpendiculaire au grand axe de l'ellipse.

2462. Application à la lumière émergeant d'une lame bi-réfringente. — La lumière polarisée ayant traversé une lame cristallisée parallèle à l'axe, nous offre un exemple des différents cas de polarisation linéaire, circulaire et elliptique. Reprenons les formules qui donnent l'intensité des deux rayons reçus dans un polariscope (2421) :

$$I_o = \cos^2\beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

$$I_e = \sin^2\beta + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta) \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda}.$$

La valeur de β, qui annule un des deux termes de chacune de ces valeurs, ne peut annuler l'autre; et si ce dernier n'est pas nul d'avance, aucun des rayons ne peut s'éteindre complètement, quand on fait varier l'angle β que fait la section principale du polariscope avec le plan primitif de polarisation. Si le second terme était nul, on aurait $I'_o = \cos^2\beta$, $I'_e = \sin^2\beta$. Le rayon ordinaire s'éteindrait pour $\beta = 0°$ ou $180°$; et le rayon extraordinaire, pour $\beta = 90°$

ou 270°. Un des rayons s'annulerait donc quand la section principale du polariscope serait parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et le faisceau qui émerge de la lame posséderait, comme le rayon incident, la polarisation rectiligne, et dans le même plan. Or, le second terme des valeurs de I_o et I_e devient nul quand l'épaisseur de la lame est telle que la différence de marche d soit égale à un nombre pair de fois $\frac{1}{2}\lambda$; car alors $\sin^2(\pi d : \lambda)$ est nul. — Si d était égal à un nombre impair de fois $\frac{1}{2}\lambda$, les valeurs de I_o et I_e deviendraient $I''_o = \cos^2\beta - \sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta)$; $I''_e = \sin^2\beta + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha-\beta)$. La première est nulle pour $\beta = 90° + 2\alpha$, et la seconde, pour $\beta = 2\alpha$. La lumière est donc, dans ce cas, polarisée dans les azimuts $90° + 2\alpha$, ou 2α.

Cas où la lumière est polarisée circulairement. — Supposons maintenant $\alpha = 45°$, auquel cas les deux faisceaux séparés par la lame sont de même intensité, et supposons que leur différence de marche soit d'un nombre impair de fois $\frac{1}{2}\lambda$. Le facteur $\sin^2\pi(d : \lambda)$ devient égal à $\frac{1}{2}$, quel que soit β, et les valeurs de I_o et I_e deviennent

$$I'''_o = \cos^2\beta = \tfrac{1}{2}\cos 2\beta = \tfrac{1}{2}, \quad \text{et} \quad I'''_e = \sin^2\beta + \tfrac{1}{2}\cos 2\beta = \tfrac{1}{2} ;$$

elles sont donc égales, quel que soit β, ce qui est le propre de la lumière polarisée circulairement.

Pour remplir les conditions que nous venons de supposer, l'axe de la lame cristallisée faisant un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, on l'incline en la faisant tourner autour d'une droite prise dans son plan perpendiculairement à l'axe, jusqu'à ce que le faisceau donne deux images égales dans toutes les positions de l'analyseur, auquel cas le faisceau est polarisé circulairement. Si alors on engage une nouvelle lame bi-réfringente entre la première et l'analyseur, et qu'on emploie de la lumière blanche, les images sont colorées ; ce qui n'aurait pas lieu si la seconde lame recevait de la lumière naturelle. En faisant varier ensuite l'inclinaison de la première lame, on obtiendra des rayons *elliptiques* à différents degrés, et en la faisant en même temps tourner sur elle-même, on pourra passer par tous les degrés d'ellipticité compris entre les polarisations circulaire et rectiligne.

2163. Polariscopes circulaires et elliptiques. — On peut obtenir tous ces résultats avec une lame normale aux rayons, en lui donnant une épaisseur convenable. Quand la section principale de cette lame fait un angle de 0° ou de 90° avec le plan primitif de polarisation, la lumière reste polarisée dans ce plan ; si l'angle est de 45°, la polarisation peut être circulaire ; elle est elliptique pour tous les autres angles. Une lame qui remplit la condition de donner aux deux rayons qu'elle sépare une différence de marche égale à $\frac{1}{4}\lambda$, se nomme *lame quart d'onde*. Pour le quartz et le gypse, l'épaisseur doit être de 0mm,0158 pour les rayons moyens du spectre. Une lame de mica quart d'onde aurait 0mm,032 ; elle donne, entre deux polariscopes, les teintes complémentaires *gris-bleuâtre* et *blanc-jaunâtre*, et quand on la pose sur la glace inférieure de l'appareil de Norremberg, ce qui revient à en doubler l'épais-

seur, les teintes *jaune-paille* et *rouge intense*. Ces couleurs permettent de reconnaître les micas quart d'onde, sans mesurer les épaisseurs. Le mica doit être à un axe et taillé parallèlement à cet axe.

Une lame quart d'onde constitue un polariscope propre à faire distinguer la lumière polarisée *circulairement*. En effet, une semblable lame apportant un retard de $\frac{1}{4}\lambda$ dans les rayons polarisés à angle droit qui engendrent le faisceau polarisé circulairement et possédant déjà un retard égal, le retard total devient égal à $\frac{1}{2}\lambda$; de sorte que ces deux rayons combinés donnent un rayon polarisé dans un plan, reconnaissable au moyen des polariscopes ordinaires ; on dit que la lame *a restauré* le rayon. Si le faisceau donné était naturel, la lame quart d'onde le laisserait naturel ; s'il était polarisé dans un plan, elle lui donnerait la polarisation circulaire ou elliptique, et il semblerait *naturel* avec les polariscopes ordinaires. On formera donc nn *polariscope circulaire*, en superposant une lame quart d'onde et un polariscope ordinaire, ajustés dans des anneaux pouvant tourner l'un dans l'autre.

On voit que la réciprocité entre les polarisateurs et les polariscopes s'étend à la polarisation circulaire ; car, ce qui a lieu pour les lames quart d'onde, aurait lieu de même pour tout appareil capable d'apporter une différence de marche de $\frac{1}{4}\lambda$ dans les deux composantes d'un rayon polarisé rectiligne. Cet appareil restaurerait un rayon polarisé circulaire et pourrait servir à former un polariscope circulaire.

§ 2. — POLARISATION ELLIPTIQUE PAR RÉFLEXION.

I. Réflexion totale et réflexion métallique.

2464. I. Réflexion totale. — Les formules qui représentent les intensités des rayons polarisés dans les azimuts principaux, après leur réflexion (2358, 2359), s'appliquent au cas où le second milieu est moins réfringent que le premier, tant que l'angle d'incidence ne dépasse pas l'*angle limite*. Mais quand l'angle limite est dépassé, les formules se compliquent d'imaginaires. En effet, remplaçant n par $1 : n$, et $\sin r$ par $n \sin i$, elles contiennent le radical $\frac{1}{n}\sqrt{1-n^2\sin^2 i}$. Quand i est égal à l'angle limite, on a $\sin i = 1 : n$ (1949), et les intensités sont égales à 1. Quand on a $\sin i > 1 : n$, la quantité sous le radical devient négative, et les valeurs des intensités sont imaginaires. D'un autre côté, Fresnel avait observé depuis longtemps, que la réflexion totale fait subir à la lumière polarisée une *dépolarisation* partielle, et que cette dépolarisation est complète dans le verre, après deux réflexions totales sous l'angle d'incidence de 54°. Ces résultats lui prouvèrent que les valeurs imaginaires que prennent les formules proviennent de ce que quelques-unes des

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLVI, p. 240.

suppositions qui servent de base au calcul cessent d'être vraies au-delà de l'angle limite. Parmi ces suppositions se trouve celle de la coïncidence de phases des ondes incidentes et réfléchies. Fresnel admit alors que le rayon polarisé, qui tombe sous une incidence intérieure plus grande que l'*angle limite*, se décompose en deux autres, polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire ; et que ces deux rayons sont en retard l'un sur l'autre, soit qu'ils se réfléchissent à des profondeurs différentes, soit qu'ils éprouvent dans l'acte de la réflexion des modifications différentes dans les périodes de leurs vibrations. Fresnel prouva qu'une semblable différence de phase doit, en effet, introduire des termes imaginaires dans des formules calculées en partant de la supposition que ces différences n'existaient pas [1] ; et, considérant le cas où cette différence de phase est de $\frac{1}{4}\lambda$, il étudia l'état des molécules d'éther dans le rayon résultant, et découvrit ainsi la polarisation circulaire et elliptique, qu'on retrouva plus tard dans d'autres phénomènes.

La discussion attentive des formules et l'interprétation des imaginaires qu'elles renferment, conduisirent Fresnel à une formule qui représente la différence de phase des deux rayons, suivant l'incidence. Cette formule indique, ce qui est conforme à l'expérience, que la différence est nulle quand l'angle d'incidence est égal à l'angle limite, ou égal à 90°. Entre ces deux termes, la différence varie d'une manière continue, et passe par un maximum qui, pour le verre de Saint-Gaubain, est sensiblement égal à $\frac{1}{8}\lambda$, et correspond à l'incidence de 54° 30′. Deux réflexions successives donneront donc une différence de marche de $\frac{1}{4}\lambda$, et, si le plan d'incidence fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, le rayon sera polarisé circulairement.

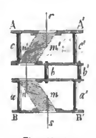


Fig. 1750.

Parallélipipèdes de Fresnel. — Fresnel a vérifié ce résultat au moyen d'un prisme en verre de Saint-Gobain *mn* (*fig.* 1750), dont les arêtes font un angle de 54° 30′ avec la base, et dans lequel le rayon *s*, polarisé dans l'azimut de 45°, subit deux réflexions totales en *m* et *n*, en entrant et sortant normalement. Ce rayon présente tous les caractères d'un polarisé circulaire. Si on le fait réfléchir deux autres fois dans un second prisme *m'n'* semblable au premier, un nouveau retard de $\frac{1}{4}\lambda$ se produit entre les deux rayons composants, le retard total est de $\frac{1}{2}\lambda$, les nœuds coïncident, et le rayon émergent *r* est *restauré* dans un plan à 45° du plan d'incidence dans le second prisme, quelle que soit la position de ce plan d'incidence par rapport à celui du premier prisme. Pour vérifier ce point, les prismes sont montés comme on le voit dans la figure ; les châssis qui les portent peuvent se déplacer en changeant de trous les tiges *b*, *b'*, de manière à faire varier l'angle des sections principales. On peut aussi séparer les deux prismes pour examiner le faisceau qui n'a subi que deux réflexions.

Fresnel a aussi calculé l'incidence qui donne les différences $\frac{1}{4}\lambda$, après trois

et quatre réflexions, et les résultats de l'expérience se sont trouvés d'accord avec ceux de la théorie.

En ne dépassant pas deux réflexions, et faisant varier l'angle d'incidence depuis l'angle limite jusqu'à 54° 30′, on obtiendra toutes les différences de marche comprise entre 0 et $\frac{1}{4}\lambda$; et par conséquent des rayons elliptiques présentant tous les degrés d'ellipticité entre la polarisation rectiligne et la polarisation circulaire.

On voit que l'un des parallélipipédes de Fresnel peut servir à former un polariscope circulaire. De plus, ce polariscope indique le sens du rayon ; car, si le plan de polarisation, après la restauration, forme un angle de 45° à droite du plan d'incidence, le circulaire est dextrorsum ; il est sinistrorsum si l'angle de 45° se forme à gauche.

2465. Expérience de M. Jamin. — M. Jamin s'est proposé de compléter et d'étendre les expériences de Fresnel, et il a pu comparer les résultats qu'il a obtenus à ceux des formules nouvelles trouvées par Cauchy. Il s'est servi de prismes de verre travaillés depuis longtemps, et ayant perdu cette sorte de trempe superficielle, que communique au verre la pression qu'il subit pendant qu'on le polit [1].

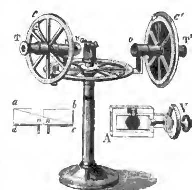


Fig. 1751.

La *figure* 1751 représente l'appareil employé dans ces nouvelles expériences. La partie principale consiste en un goniomètre de M. Babinet (1915) dont les collimateurs sont remplacés par des tubes T*v*, *o*T′ contenant des prismes de Nicol qu'on peut faire tourner sur eux-mêmes de quantités angulaires mesurées sur des cercles gradués *c* et *c′*. Sur la plate-forme disposée au centre de l'appareil, se fixe la pièce sur laquelle la lumière polarisée doit se réfléchir. Cette lumière, avant d'arriver au polariscope, traverse un appareil *compensateur v* figuré à part en AV, et dont on voit la coupe en *abd*. Cet appareil consiste en deux lames de quartz un peu prismatiques *abc*, *adc*. Les faces *ab*, *cd* sont parallèles à l'axe; mais dans l'une l'axe est parallèle à l'arête de sommet *a*, dans l'autre il lui est perpendiculaire; de manière que les axes des deux lames sont croisées à angle droit. L'une des lames est fixe, et l'autre peut se déplacer au moyen d'une vis micrométrique V. Deux fils tendus verticalement *n*, *n*, limitent l'espace dans lequel on doit observer.

Supposons un rayon polarisé dans un plan incliné de 45° sur les axes des lames. Ce rayon, en pénétrant dans la première, se divisera en deux autres :

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXX, p. 257.

l'ordinaire deviendra l'extraordinaire dans la seconde, et *vice versâ* ; de manière que si les trajets dans les deux lames sont égaux, les différences de marche se compenseront. C'est ce qui a lieu dans la position figurée des deux lames, et ce que l'on reconnait en ce que l'analyseur étant tourné à l'obscurité en l'absence du *compensateur*, il continue à donner une bande noire entre les fils *n*, *n* quand celui-ci est interposé. Si l'on fait marcher la vis, les épaisseurs des deux lames deviennent inégales entre les deux fils *n*, *n*. L'un des rayons conserve une différence de marche, qu'on pourra rendre égale à $\frac{1}{2}\lambda$; alors la lumière sera polarisée dans l'azimut de — 45°, et l'on retrouvera l'obscurité en tournant l'analyseur, de 90°. Entre ces deux limites, on aura des différences de marche *d*, qui seront données par le déplacement x du prisme comparé à celui, *a*, qui donne la différence $\frac{1}{2}\lambda$, au moyen de la proportion $x : a = d : \frac{1}{2}\lambda$. Les déplacements sont mesurés au moyen de la vis micrométrique. La tête de cette vis donne $\frac{1}{200}$ de tour, et l'angle des prismes est assez faible pour qu'un déplacement de 6^{mm}, correspondant à 12 tours de vis, suffise pour donner la différence $\frac{1}{2}\lambda$.

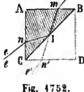


Fig. 1752.

Voici comment cet appareil a été appliqué à l'étude de la réflexion totale : le rayon polarisé en T dans l'azimut de 45° se décompose par réflexion totale sur la face hypothénuse du prisme BAC (*fig.* 1752), forme un rayon elliptique que l'on restaure au moyen du *compensateur*, en faisant réaliser à ce dernier une différence de marche égale et de signe contraire à celle des rayons qu'il reçoit. Le cercle gradué horizontal (*fig.* 1751) fait alors connaître l'incidence sur la face d'entrée, et l'on en déduit l'angle de réflexion totale, l'indice de réfraction étant connu.

Une partie de la différence de marche pouvait être due aux deux réfractions, et à des défauts d'homogénéité de la substance. Pour évaluer cette partie, on forme un parallélipipède rectangle ABDC (*fig.* 1752), en appliquant sur le prisme BAC une portion BDC du même prisme coupé en deux perpendiculairement à ses arêtes. Les surfaces sont réunies par de l'essence de cassia mêlée d'une quantité de térébenthine convenable pour donner à ce mastic le même indice que le verre. Le rayon suit alors la route *smIn'e'*, en restant soumis à toutes les mêmes causes de retard que le rayon *smIne* ; on mesure la différence de marche au moyen du compensateur, et on la retranche de celle qu'on avait trouvée pour le rayon *smIne*.

Pendant que se faisaient ces expériences, Cauchy reprenait la théorie de la réflexion totale, plus généralement que Fresnel, reconnaissait, comme ce dernier, que toute la lumière est réfléchie, et arrivait, pour exprimer la différence de phase *d*, en appelant I l'angle limite, à la formule

$$\frac{\operatorname{tang}\frac{1}{2}\,d}{\cos i} = \varepsilon + \frac{\sin^{\frac{1}{2}}(i-\mathrm{I})\sin^{\frac{1}{2}} i+\mathrm{I})}{\sin^2 \mathrm{I}},$$

dans laquelle ε est une constante qu'il nomme *le coefficient d'ellipticité*. Les expériences faites, de l'incidence de 40° à celle de 83°, ont donné des résultats d'accord avec cette formule, et aussi avec celle de Fresnel, qui n'en diffère que par l'absence du terme ε, qui est excessivement petit pour le verre.

2466. II. POLARISATION ELLIPTIQUE DANS LA RÉFLEXION MÉTALLIQUE. — Malus avait annoncé d'abord que la lumière réfléchie par les métaux n'était pas polarisée, et il trouva plus tard qu'elle semblait polarisée dans différents plans. On remarqua ensuite que la réflexion métallique paraissait *dépolariser* la lumière préalablement polarisée. M. Brewster, en 1815, a étudié la question en détail par l'expérience, et a découvert de son côté la polarisation dans différents plans. Il faisait réfléchir la lumière entre deux lames de métal parallèles, dont il changeait la distance, de manière à faire varier le nombre de réflexions d'un rayon sous une incidence donnée avant de les quitter. Voici les principales lois auxquelles il est arrivé :

1° La lumière *naturelle*, réfléchie sur les métaux, est polarisée plus fortement dans le plan d'incidence que dans tout autre plan. L'excès de la quantité polarisée dans ce plan, sur celle qui l'est dans le second azimut, varie avec les métaux ; il est le plus petit pour l'argent, et le plus grand pour le plomb, et suit l'ordre de la liste ci-dessous. Il augmente avec le nombre de réflexions et avec l'angle d'incidence. Sous l'incidence de 75°, la lumière d'une bougie, placée à 3 mètres de distance était entièrement polarisée après 36 réflexions sur l'argent poli, et après 8, sur l'acier.

2° Un rayon *polarisé* dans l'un des azimuts principaux, reste polarisé dans cet azimut après la réflexion métallique.

3° Quand les rayons sont polarisés dans l'azimut de 45°, il y a une incidence, variable avec les métaux, pour laquelle le rayon, réfléchi un *nombre impair* de fois, présente tous les caractères de la polarisation *circulaire*. Cet angle est, pour les métaux suivants :

argent	*or*	*étain*	*cuivre*	*mercure*	*platine*	*zinc*	*acier*	*cobalt*	*plomb.*
39°,48′	35°	32°	29°	26°	22°	19°	17°	12°,30′	11°

Quand les incidences sont différentes, ou les azimuts de polarisation autres que 45°, le rayon réfléchi présente la polarisation *elliptique*.

4° Le rayon polarisé circulairement est *restauré*, c'est-à-dire ramené à la polarisation rectiligne, par un nombre pair de réflexions sous la même incidence sur le même métal, et il est à remarquer que l'angle des plans de réflexion, dans les deux transformations, peut être quelconque.

5° Mais si l'angle d'incidence avec lequel s'est faite la première transformation, n'est pas celui de la polarisation circulaire, l'angle d'incidence nécessaire pour restaurer le rayon, après un nombre pair de réflexions, change avec l'angle des deux plans de réflexion, et varie comme les diamètres d'une ellipse. De là le nom de *polarisation elliptique* donné par M. Brewster

à l'état des rayons réfléchis qu'on cherche à restaurer ; mot auquel il n'attribuait pas le sens théorique que nous lui donnons aujourd'hui. Du reste, ces rayons se distinguent toujours par les couleurs qu'ils donnent dans le polariscope. Ces couleurs, au maximum dans l'azimut de 45°, disparaissent dans les azimuts principaux, et dépendent de l'angle d'incidence.

Malgré l'importance des expériences de M. Brewster, l'étude de la réflexion métallique était loin d'être complète ; plusieurs lois restaient à trouver, et la question n'avait été envisagée qu'au point de vue expérimental. M. de Sénarmont a fait des recherches étendues sur le même sujet [1], et a publié un très grand nombre de résultats numériques obtenus avec divers métaux. Il établit qu'un rayon polarisé dans un azimut quelconque, se décompose en deux autres polarisés dans les azimuts principaux ; ce qui conduit à étudier les effets de la réflexion métallique sur ces deux espèces de rayons ; et comme, d'aprés M. Brewster, le plan de polarisation de semblables rayons ne change pas pendant la réflexion, les modifications qu'ils subissent ne peuvent être que des variations d'intensité ou des changements de phases. On est donc conduit à étudier les intensités et les phases des rayons réfléchis polarisés dans les azimuts principaux. C'est aussi la marche qu'a suivie M. Jamin dans un grand travail sur la réflexion métallique.

2467. Expériences de M. Jamin. — Ces expériences ont été faites au moyen de l'appareil (*fig.* 1751).

Mesure des intensités des rayons réfléchis. — Pour étudier les intensités des rayons polarisés dans les azimuts principaux, réfléchis par une lame métallique, on la fixe bien verticalement au centre de l'appareil, juxta-posée à une lame de verre, de manière que les surfaces polies de métal et de verre soient bien exactement dans le même plan. Le faisceau polarisé tombant sur le double miroir, une partie est réfléchie par le verre, et l'autre par le métal, et l'on compare la quantité de lumière réfléchie par le métal à celle que réfléchit le verre, calculée au moyen des formules de Fresnel. Quand l'analyseur a sa section principale horizontale ou verticale, il ne donne qu'une seule image pour chaque demi-faisceau. Si on le fait tourner ensuite d'une quantité β, on obtient deux images de chaque demi-faisceau. Soit J^2 l'intensité des rayons polarisés dans le premier azimut et réfléchis par le métal, et J'^2 l'intensité des mêmes rayons réfléchis par le verre ; les intensités des quatre faisceaux sortant de l'analyseur seront, pour les rayons ordinaires $J^2 \cos^2 \beta$ et $J'^2 \cos^2 \beta$; et pour les rayons extraordinaires, $J^2 \sin^2 \beta$ et $J'^2 \sin^2 \beta$. Si l'on fait varier β, on trouve une position de l'analyseur pour laquelle l'image ordinaire du métal est égale à l'image extraordinaire du verre. On a alors $J^2 \cos^2 \beta = J'^2 \sin^2 \beta$. Or, d'après la formule de Fresnel (2358), J'^2 est égal à $\frac{\sin^2 (i-r)}{\sin^2 (i+r)}$; on a donc $J^2 = \tang^2 \beta \frac{\sin^2 (i-r)}{\sin^2 (i+r)}$. On pourrait de

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LXXIII, p. 337.

même chercher la valeur β' qui rend l'image extraordinaire du métal égale à l'image ordinaire du verre, et l'on aurait $J^2 = \cot^2 \beta' \frac{\sin^2 (i-r)}{\sin^2 (i+r)}$. Les angles β et β' sont complémentaires, et se mesurent sur le limbe c de l'appareil (*fig.* 1751).

La même méthode s'applique à la lumière incidente polarisée dans le second azimut, et l'intensité I^2 du rayon réfléchi par le métal, sera donnée (2359) par la formule $I^2 = \tang^2 \beta \frac{\tang^2 (i-r)}{\tang^2 (i+r)}$; seulement, les expériences ne seront pas possibles pour les incidences très voisines de l'angle de polarisation sur le verre, puisque la réflexion sur cette substance est alors nulle ou à peine sensible.

Les expériences étaient faites dans l'obscurité, et la lumière venait d'une lampe Carcel dont les rayons étaient rendus parallèles par une lentille. La valeur de i se mesurait sur le cercle horizontal de l'appareil, et celle de r s'en déduisait au moyen de l'indice de réfraction du verre.

Ces expériences, faites avec l'acier, le métal des miroirs et le cuivre, ont prouvé que l'intensité des rayons réfléchis polarisés dans le plan d'incidence, varie peu, et diminue progressivement, depuis l'incidence de 90° jusqu'à celle de 0°. Quand les rayons sont polarisés dans le second azimut, l'intensité diminue, de 90° à l'angle de polarisation maximum, et augmente ensuite jusqu'à l'incidence normale.

Les nombres obtenus par M. Jamin se sont trouvés d'accord, autant qu'on pouvait le désirer, avec ceux que donnent les formules nouvelles de Cauchy, exprimant les intensités des rayons réfléchis par les corps opaques.

2468. Différences de phase. — Voici d'abord les deux méthodes par lesquelles M. Jamin prouve l'existence d'une différence de phase après la réflexion métallique, entre deux rayons polarisés dans les azimuts principaux.

1° On choisit une lame de sulfate de chaux donnant, dans la lumière polarisée, la teinte sensible ; on place son axe parallèlement au plan d'incidence des rayons solaires réfléchis par le métal, rayons qui sont polarisés dans un azimut voisin de 90°. S'il ne s'établissait pas de différence de phase entre les rayons composants polarisés dans les azimuts principaux, la teinte de la lame resterait la même, l'azimut seul changerait. Mais l'expérience montre que la teinte est modifiée. On en doit conclure que, à la différence de marche produite par la lame, vient s'en ajouter une autre, produite par la réflexion. La teinte change avec l'incidence, de manière à prouver que la différence de marche due à la réflexion, augmente depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidente rasante. Cette méthode peut servir à prouver l'existence d'une différence de marche dans le cas de la réflexion totale.

2° La seconde méthode s'applique aux couches minces d'oxyde déposées sur les métaux [1]. M. Jamin a opéré sur l'acier coloré par l'oxyde qui se produit

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXI, p. 430.

pendant le recuit, et sur des lames de maillechort recouvertes d'oxyde de plomb par le procédé de M. Becquerel (III, 1593). Ces lames présentaient des séries de franges parallèles, dont les couleurs dépendaient de l'épaisseur de l'oxyde déposé. Les épaisseurs aux différents points, étaient mesurées directement, et représentées par une courbe. Opérant d'abord sous diverses incidences, avec de la lumière simple polarisée dans le second azimut, on a trouvé exacte la formule $e' = e : \cos r$, qui fait connaître le rapport des épaisseurs e, e', qui produisent une même frange, pour l'incidence normale et pour l'incidence qui donne l'angle de réfraction r dans la couche d'oxyde (2308) [1]. Mais il n'en est plus de même quand la lumière est polarisée dans le plan d'incidence ; les positions d'une frange donnée ne sont plus les mêmes qu'avec le rayon polarisé dans le second azimut. On en conclut que l'acte même de la réflexion occasionne un retard qui s'ajoute à celui qui provient de la différence de chemin parcouru. Les chemins parcourus, pour une même frange noire, étant représentés par $2\,E \cos r$, et par $2\,e \cos r$, pour les rayons polarisés dans le plan d'incidence et pour les rayons polarisés dans l'azimut de 90° sous la même incidence, $2\,(E-e) \cos r$ sera la différence de phase due à l'action seule de la réflexion ; et il suffira, pour la connaître, de mesurer r et les épaisseurs E et e. On a trouvé ainsi que la différence de phase due à la réflexion, est nulle sous l'incidence normale ; que le rayon polarisé dans l'azimut de 90° se trouve ensuite de plus en plus en retard sur l'autre ; et que le retard prend la valeur $\frac{1}{4}\lambda$ sous l'angle de polarisation maximum, et $\frac{1}{2}\lambda$ sous l'incidence rasante. — Cette dernière méthode ne peut s'appliquer aux métaux ; mais, comme M. Brewster a trouvé que les métaux et les oxydes agissent de la même manière sur la lumière polarisée, et que, d'un autre côté, deux réflexions sur une surface métallique sous l'incidence de la polarisation maximum restaurent le rayon (2466), ce qui indique une différence de phase de $\frac{1}{2}\lambda$ entre les deux rayons composants, ou de $\frac{1}{4}\lambda$ à chaque réflexion, comme pour les oxydes, on est autorisé à étendre aux métaux, les résultats donnés par les minces couches d'oxyde.

Evaluation des différences de phase. — On fait réfléchir le rayon polarisé dans un azimut quelconque, plusieurs fois entre deux miroirs parallèles et de même métal ; les plans de polarisation des rayons composants polarisés dans les azimuts principaux ne changent pas, et la différence de phase augmentant de la même quantité à chaque réflexion, elle sera, après m réflexions, égale à m fois la différence produite par une seule. Or, d'après M. Brewster, après un certain nombre de réflexions, la polarisation devient rectiligne ; en divisant donc la différence de phase correspondante, par le

[1] Pour connaître l'angle r d'après l'angle d'incidence donné, il faut connaître l'indice de réfraction de la couche d'oxyde. Cet indice se détermine en cherchant l'incidence d'un rayon polarisé dans l'azimut 0°, qui donne les franges les moins marquées. L'indice de réfraction se déduit alors de la formule $\tan i = n$ (2346).

nombre de réflexions, on aura celle qui serait engendrée par une seule; différence qui donne une polarisation elliptique. L'expérience montre que, pour chaque nombre m de réflexions, il y a plusieurs angles d'incidence donnant la polarisation rectiligno, et le nombre de ces angles est $m-1$.

La polarisation rectiligne ayant lieu toutes les fois que la différence de phase est un multiple entier de $\frac{1}{2}\lambda$, il faut d'abord connaître ce multiple. Or, la différence de phase augmentant avec l'incidence, la plus petite incidence qui rétablira la polarisation rectiligne aprés m réflexions, donnera, pour cette différence, le plus petit multiple, ou $\frac{1}{2}\lambda$. Pour les angles plus grands rétablissant également la polarisation rectiligne, les multiples seront $2\frac{1}{2}\lambda$, $3\frac{1}{2}\lambda$... $(m-1)\frac{1}{2}\lambda$. Les différences de phase produites dans chaqne réflexion, seront alors $\frac{1}{m}\frac{\lambda}{2}$, $\frac{2}{m}\frac{\lambda}{2}$, ... $\frac{m-1}{m}\frac{\lambda}{2}$. On voit que, si l'on fait varier le nombre de réflexions, la même valeur du coefficient de $\frac{1}{2}\lambda$ se produira souvent. Par exemple, aprés 2, 4, 6,... réflexions, ce coefficient prendra les valeurs égales $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{6}$...., et les angles de polarisation rétablie seront égaux; ce qui fournit de nombreuses vérifications. On voit aussi que les résultats sont indépendants de l'azimut de polarisation du rayon incident, pourvu que ce ne soit pas un des azimuts principaux.

Les deux miroirs égaux étaient placés au centre de l'appareil (*fig.* 1751); l'un, fixe, passait par le centre, l'autre pouvait se déplacer parallèlement à lui-même, au moyen d'une vis micrométrique, et le nombre des réflexions dépendait de leur distance. Le rayon réfléchi ne passant pas par le centre de l'appareil, on faisait tourner dans un plan horizontal, le tube qui contient l'analyseur, de manière que le rayon le traversât toujours suivant son axe.

2469. Comparaisons avec la théorie. — Cauchy et M. Mac-Cullagh ont trouvé, chacun de leur côté, des formules presque identiques pour représenter les phénomènes de la réflexion métallique. Le premier a trouvé, pour la différence de phase δ de deux rayons de même phase avant la réflexion, et polarisés dans les azimuts 0 et 90°, la formule $\tang\delta = \tang 2\omega \sin u$, dans laquelle ω se calcule au moyen de l'expression $\tang\omega = \frac{U\cos i}{\sin^2 i}$; u et U sont des variables, liées à i et à certaines constantes, par des relations établies par Cauchy. Cette formule a été vérifiée par M. Jamin.

M. Jamin a entrepris beaucoup d'autres vérifications, parmi lesquelles nous citerons celles qui suivent. Nous savons que la lumière polarisée dans un plan, se transforme, en général, en un faisceau elliptique, quand elle se réfléchit sur un métal. Les formules de Cauchy permettent de calculer le rapport des longueurs des axes de l'ellipse, et leur direction; pour vérifier ces formules, M. Jamin cherche la direction des axes, en partant des deux principes suivants, qu'il démontre par l'analyse: 1° Quand un faisceau elliptique traverse un prisme bi-réfringent dont la section principale est parallèle à l'un des axes de l'ellipse, il se décompose en deux rayons dont les phases diffèrent de $\frac{1}{4}\lambda$, et

dont l'un a la plus grande, et l'autre la plus petite intensité possible. 2° Si la section principale de l'analyseur fait un angle de 45° avec les axes de l'ellipse, les images sont égales. Il suffira donc de chercher la position du prisme qui donne les deux images les plus inégales ; l'azimut dans lequel l'image extraordinaire sera minimum donnera la direction du petit axe, et le rapport des intensités des images sera égal au carré du rapport de longueur des deux axes. Il vaut mieux chercher à obtenir les deux images égales, ce qui a lieu pour quatre positions de l'analyseur, dont la section principale est alors à 45° des axes cherchés. C'est ainsi qu'a procédé M. Jamin. Il opérait avec de la lumière rouge simple, et il a trouvé des résultats d'accord avec ceux de la théorie.

2470. De la couleur des métaux. — M. Jamin a pu, en partant de la théorie de la réflexion métallique, trouver l'explication des couleurs que présente la lumière réfléchie par les métaux polis [1]. Remarquons que l'intensité de la lumière réfléchie par les corps non métalliques, dépendant de l'indice de réfraction, cette intensité est différente sous la même incidence pour les diverses couleurs ; la lumière blanche devrait donc être colorée après la réflexion ; et s'il n'en est pas ainsi, c'est que les différences entre les indices sont très petites. Les mêmes considérations, appliquées aux métaux, conduisent à l'explication de leur coloration. Dans ce cas, les intensités sont calculées au moyen des formules de Cauchy. Ces formules contiennent deux constantes : la première, qui ne dépend que de la différence de phase, est l'incidence qui rétablit la polarisation rectiligne après deux réflexions sur des lames parallèles; la seconde, qui ne dépend que du rapport des intensités des rayons composants polarisés dans les azimuts principaux, est l'azimut du plan de polarisation sous cette incidence, quand l'azimut de polarisation primitive est de 45°. M. Jamin a mesuré les valeurs de ces constantes, pour les différents rayons du spectre, et il est arrivé aux lois suivantes :

1° L'incidence qui rétablit la polarisation rectiligne, et qui est celle du maximum de polarisation, va en diminuant du rouge au violet, pour tous les métaux et alliages observés. Il est à remarquer que, pour les substances non métalliques, cet angle varie au contraire en sens opposé. — 2° L'azimut du plan de polarisation rétablie diminue, du rouge au violet, pour une classe de métaux comprenant l'*argent*, le *cuivre*, le *laiton*, le *métal des cloches*. Les différences pour les couleurs extrêmes sont de 0°,50 pour l'*argent*, et de 7°,12′ pour le *métal des cloches*. — 3° L'azimut augmente, au contraire, du rouge au violet, pour une autre classe comprenant le *zinc* et l'*acier*. — 4° Pour le métal des miroirs, les azimuts diminuent du rouge au vert, et augmentent du vert au violet.

Les valeurs des constantes une fois déterminées, M. Jamin les a portées dans les formules de Cauchy, pour calculer les intensités des rayons réfléchis

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXII, p. 311.

de chaque couleur composant la lumière blanche, et en conclure la teinte du faisceau réfléchi. Voici les résultats généraux auxquels il est arrivé :

1° Sous l'incidence rasante, tous les métaux polis sont absolument blancs. — 2° Tous les métaux de la première classe sont colorés des teintes les moins réfrangibles, et deviennent rouges après des réflexions suffisamment nombreuses. Le métal des miroirs se comporte de la même manière. — 3° Les métaux de la deuxième classe, pouvant offrir toutes les couleurs du spectre, sont le plus souvent blancs. — 4° La teinte de plusieurs métaux a été calculée, et trouvée identique à celle que donne l'expérience.

II. Polarisation elliptique dans la réflexion par les corps transparents.

2471. La plupart des corps transparents polarisent incomplètement la lumière par réflexion, même sous l'angle de polarisation. Si l'on a cru longtemps à une polarisation totale, c'est qu'on employait la lumière assez faible des nuées; quand on emploie les rayons directs du soleil, on est facilement détrompé. Ces rayons présentent, en outre, l'avantage de faire connaître facilement le minimum d'éclat, à cause de la grande vivacité que prend rapidement la lumière dès qu'on s'écarte des conditions de ce minimum.

Quand la lumière incidente est polarisée, il se produit une *dépolarisation* partielle, et M. Jamin prouve que la lumière réfléchie possède alors la polarisation elliptique [1]; il fait voir qu'un rayon polarisé dans un azimut voisin de 90°, se décompose en deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et en retard l'un sur l'autre ; et cela, par le même moyen que pour les métaux (2468), en se servant d'une lame de sulfate de chaux donnant la teinte sensible, et constatant que cette teinte varie de $\frac{1}{4}\lambda$, de l'incidence rasante à l'angle de polarisation, au-delà duquel elle continue à descendre.

Mesure de la différence de phase. — Cette mesure s'effectue au moyen du *compensateur* (2467). Supposons que l'axe du prisme mobile *abc* (*fig.* 1751) soit horizontal, et que, pour restaurer le rayon, il faille augmenter l'épaisseur de ce prisme entre les fils *n*, *n*. Le quartz étant négatif, le rayon ordinaire, polarisé horizontalement dans le plan d'incidence, aura une vitesse plus grande que le rayon extraordinaire, polarisé perpendiculairement à ce plan. La différence de marche sera alors prise *positivement*. Quand le prisme mobile devra être retiré en sens contraire, la différence sera *négative*.

Cela posé, quand le compensateur donnera une différence de marche a pour restaurer le rayon, la différence x produite par la réflexion sera telle que l'on ait $x+a=\pm n\frac{1}{2}\lambda$; n étant un facteur entier qu'il s'agit de trouver. Or, l'expérience montre que la lumière polarisée dans l'azimut de 45° reste

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXIX, p. 263.

polarisée après la réflexion, sous l'incidence normale et sous l'incidence rasante, et même assez loin de ces limites en se rapprochant du maximum de polarisation. Dans le premier cas, le rayon réfléchi est polarisé dans l'azimut de —45° ; il faut donc que le sens de la vibration dans l'un des rayons composants ait changé de signe, ce qui suppose un changement de phase de $\frac{1}{2}\lambda$. Dans le cas d'incidence rasante, l'azimut du rayon réfléchi reste à 45°. Le changement de phase est donc nul ou égal à λ; et l'on admet la dernière valeur, parce que le changement de phase va en augmentant à partir de l'incidence normale. Maintenant, quand on emploiera le compensateur, qui apporte une différence de phase comprise entre 0 et $\frac{1}{2}\lambda$, on voit que $x+a$ sera compris entre 0 et $\frac{3}{2}\lambda$. En dehors des incidences extrêmes, cette somme ne pourra donc être, quand le rayon sera restauré, que $\frac{1}{2}\lambda$ ou $\frac{3}{2}\lambda$. Si la somme est égale à $\frac{1}{2}\lambda$, l'une des composantes du rayon polarisé sortant du compensateur aura changé de signe, et le plan de polarisation sera dans un autre quadrant que celui du rayon incident. Si $x+a=\frac{3}{2}\lambda$, il n'y aura pas de changement de quadrant.

On a trouvé par cette méthode, que la différence de phase des deux composantes, augmente, de $\frac{1}{2}\lambda$ à λ, depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante, et prend la valeur $\frac{3}{4}\lambda$ sous l'angle de polarisation.

Application à la détermination de l'angle de polarisation. — Ce dernier résultat peut servir à trouver l'angle de polarisation, d'une manière bien plus précise que par le moyen ordinaire : on dispose le compensateur, de manière qu'il produise la différence de marche de $\frac{3}{4}\lambda$, et l'on fait varier l'incidence jusqu'à ce que la frange de polarisation rétablie se place entre les fils. Comme, dans le voisinage de l'angle de polarisation, les moindres variations de l'incidence produisent un grand changement dans la différence de phase, la détermination est très exacte.

Mesure du rapport des intensités des composantes réfléchies. — Soit α l'azimut du plan de polarisation du rayon incident, dont l'intensité est 1. Ce rayon peut se remplacer par deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et ayant pour intensités, *cos* α et *sin* α. Ces intensités sont modifiées par la réflexion, et deviennent I cos α et J sin α, et il faut déterminer le rapport J : I. Pour cela, il suffit de chercher, avec l'analyseur, l'azimut β du rayon restauré par le compensateur, qui n'apporte aucun changement à ces intensités et ne fait que modifier la différence de phase. D'après la règle du parallélogramme des vitesses, on aura alors

$$\operatorname{tang}\beta=\frac{J\sin\alpha}{I\cos\alpha}\,;\quad \text{d'où}\quad \frac{J}{I}=\frac{\operatorname{tang}\beta}{\operatorname{tang}\alpha}.$$

En prenant α très grand, l'erreur commise en mesurant β est insensible dans le résultat. Par exemple, si $\alpha=84°$, d'où tang $\alpha=9{,}504$, l'erreur énorme de 4° dans β, n'altérerait que de 0,007 le rapport J : I.

Expériences sur les liquides. — Les expériences sur les liquides ont

exigé un instrument spécial. Le cercle horizontal de l'appareil (*fig.* 1751) est remplacé par un demi-cercle vertical fixé à une petite table à vis calantes, et sur lequel se meuvent des tubes à cercles gradués, portant, l'un l'analyseur et le compensateur, l'autre, le polarisateur et un petit miroir métallique destiné à renvoyer les rayons solaires suivant son axe. Au centre du demi-cercle vertical est placé un petit vase en verre noir contenant le liquide.

2472. Lois et résultats généraux. — Voici les résultats généraux déduits d'expériences nombreuses faites sur une centaine de substances, tant solides que liquides :

1° Presque toutes les substances solides et liquides polarisent incomplétement la lumière naturelle ; et, quand la lumière incidente est polarisée dans un plan, elle reçoit la polarisation elliptique. — 2° Les substances qui, comme l'opale et le diamant, ont un indice de réfraction supérieur à 1,4, avancent la phase du rayon composant polarisé dans le plan d'incidence ; elles sont dites *positives*. Les métaux doivent être rangés en tête de cette catégorie. Les substances, comme l'hyalite, la fluorine, dont l'indice est inférieur à 1,4, sont *négatives*, c'est-à-dire qu'elles retardent la phase du rayon considéré. Enfin, les substances dont l'indice diffère très peu de 1,4, ne donnent ni avance ni retard relatif aux deux rayons composants, et elles sont capables de polariser complètement la lumière. M. Jamin n'a trouvé que deux substances dans ce cas ; la première est un échantillon de ménilite, la seconde, un cristal d'alun taillé perpendiculairement à l'axe de l'octaèdre. L'indice du crown, 1,48, s'éloigne peu de cette valeur ; aussi a-t-on cru longtemps qu'il polarisait complètement. — 3° La différence de phase augmente avec l'incidence, depuis $\frac{1}{2}\lambda$ jusqu'à λ, et prend la valeur de $\frac{3}{4}\lambda$, pour l'angle de polarisation maximum. Mais ce n'est que dans le voisinage de ce dernier angle, que les variations sont sensibles, et entre deux limites d'autant plus rapprochées, que la lumière est polarisée en plus grande quantité sous l'angle de polarisation maximum, ou que l'indice se rapproche davantage de la valeur 1,4. En dehors de ces limites, la polarisation est *rectiligne*, quoique incomplète ; en dedans, elle est *elliptique*. Les limites se confondent quand l'indice de réfraction est égal à 1,4 ; alors, il n'y a plus de polarisation elliptique, la polarisation est complète sous une certaine incidence, et la différence de phase passe brusquement de $\frac{1}{2}\lambda$ à λ, sous l'angle de polarisation. C'est là le cas représenté par les formules de Fresnel, et que l'on supposait être le cas général. Chez les métaux, les variations dans la différence de phase sont sensibles, depuis l'incidence normale jusqu'à l'incidence rasante ; aussi le rayon réfléchi posséde-t-il toujours la polarisation elliptique. — 4° Quand on superpose deux substances, la réflexion à leur surface de séparation suit les mêmes lois. Les expériences ont été faites sur des lames solides plongées dans des liquides.

Formules de Cauchy. — Longtemps avant ces expériences, Cauchy avait calculé, sans faire aucune hypothèse, des formules représentant la différence de phase et le rapport des intensités des rayons composants polarisés dans

les azimuts principaux aprés leur réflexion sur les substances transparentes. Ces formules ne dépendent pas seulement de l'indice de réfraction, mais encore d'une autre constante ε, nommée *coefficient d'ellipticité*, et que Cauchy croyait nulle, excepté pour quelques substances à très grand pouvoir réfringent, comme le diamant, le soufre. Il résulte des nouvelles expériences, que ε n'est, au contraire, nul que pour les corps en trés petit nombre qui polarisent complètement la lumiére ; elles font voir aussi que la différence de phase est tantôt positive, tantôt négative, ce que les formules n'indiquent pas. Les nombreuses comparaisons faites par M. Jamin, entre les résultats de l'expérience et ceux que donnent les formules, montrent que celles-ci représentent les phénoménes avec une exactitude remarquable. Voici ces formules :

$$\frac{J^2}{I^2}=\frac{\cos^2(i+r)+\varepsilon^2\sin^2 i\sin^2(i+r)}{\cos^2(i-r)+\varepsilon^2\sin^2 i\sin^2(i-r)}\ ;$$

$\delta=\delta'+\delta''$; tang $\delta'=\varepsilon$ sin i tang $(i+r)$; tang $\delta''=\varepsilon$ sin i tang $(i-r)$. δ est la différence de phase, et ε une quantité trés petite pour la plupart des substances non métalliques ; de sorte que, si on la suppose nulle, la valeur de δ est aussi nulle, et celle de $J^2 : I^2$ devient $\frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)}$, qui est précisément la valeur que donnent les formules de Fresnel, pour le rapport des intensités de deux rayons polarisés dans les azimuts principaux (2358, 2359). Il n'est donc pas étonnant que les méthodes peu précises que l'on employait autrefois pour vérifier ces formules, aient conduit à une concordance satisfaisante pour le plus grand nombre des substances non métalliques, quoique ces formules ne s'appliquent rigoureusement qu'à celles qui sont susceptibles de polariser complètement par réflexion.

2473. Réflexion sur les cristaux bi-réfringents. — L'intensité des rayons réfléchis dépendant de celle des rayons réfractés, et celle-ci variant dans les milieux bi-réfringents, avec l'angle que font le plan d'incidence et la section principale, on conçoit que l'état du rayon réfléchi dépendra de la position du plan de réflexion par rapport à cette section. Cette question n'a été étudiée qu'aprés la découverte de la polarisation elliptique ; M. Brewster a découvert d'abord le plus grand nombre des faits; M. Seebeck a aussi fait de nombreuses expériences; puis, MM. Mac-Cullagh, Newmann, de Sénarmont ont traité la question au point de vue théorique et expérimental. Voici quelques-unes des lois établies :

Considérons d'abord un rayon polarisé tombant normalement sur la surface d'un cristal. Si le plan de polarisation coïncide avec la section principale, le rayon réfléchi présente une intensité qui dépend du rayon réfracté ordinaire, et qui doit se calculer au moyen des formules de Fresnel (2358, 2359), en y portant l'indice ordinaire. Si le plan de polarisation est perpendiculaire à la section principale, l'intensité du rayon réfléchi dépend de l'indice extraordi-

naire. — Si le plan de polarisation est oblique à la section principale, le rayon se décompose en deux autres, polarisés dans les azimuts principaux, et qui donnent des rayons réfractés dont les intensités I et J, d'après ce qui vient d'être dit, sont différentes; de manière que le rayon résultant est polarisé dans un autre plan que le rayon incident, plan dont l'azimut β est donné par la formule tang $\beta = J : I$.

Quand, le rayon n'étant pas normal à la surface réfléchissante, le plan d'incidence coïncide avec la section principale, si le rayon est polarisé dans le premier ou dans le second azimut, l'intensité du rayon réfléchi est donnée par les formules de Fresnel; dans le premier cas, il faut employer l'indice de réfraction ordinaire, et dans le second, l'indice extraordinaire. — Si l'azimut est différent, on décompose le rayon en deux autres polarisés dans les azimuts principaux, et on leur applique ce qui précède.

M. de Sénarmont a examiné beaucoup d'autres cas relatifs à la position du plan d'incidence par rapport à la section principale, à la direction de l'axe par rapport à la face réfléchissante, etc. [1]. Ayant ensuite étudié la réflexion sur les cristaux doués de l'opacité métallique, comme le sulfure d'antimoine, il a trouvé que tous les phénomènes sont exactement calqués sur ceux qui se produisent dans la réflexion à la surface des corps cristallisés transparents; ce qui prouve l'existence de la *double réfraction* dans des cristaux essentiellement *opaques*, c'est-à-dire pour lesquels la lumière s'éteint à une très petite profondeur au-dessous de la surface réfléchissante.

2474. Réflexion métallique produite par des corps non métalliques. — M. Brewster a remarqué, vers 1846, que les cristaux de *chrysammate de potasse* réfléchissent de la lumière colorée ayant l'aspect de celle que réfléchissent les métaux polis, et changeant de nuance avec l'incidence. Cette lumière, analysée dans un polariscope bi-réfringent, se comporte comme si elle était formée d'un faisceau polarisé dans le plan d'incidence, dont la couleur, bleu-pâle, est indépendante de l'incidence; et d'un faisceau polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, et dont la nuance varie du jaune pur au violet pourpre, quand on augmente l'angle d'incidence à partir de 0°. M. Haidenger a constaté des propriétés semblables dans un grand nombre d'autres substances [2]. M. Stokes ayant remarqué que la *carthamine* est opaque pour la lumière verte, presque comme un métal, et qu'elle réfléchit *spéculairement* de la lumière colorée, composée d'un faisceau vert très intense polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, et d'un faisceau polarisé dans ce plan et faiblement coloré, a eu l'idée de chercher si cette substance ne se rapprocherait pas, par ses propriété optiques, des métaux, qui, polis, sont colorés par réflexion, contrairement aux corps transparents, qui ne donnent de couleurs

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XX, p. 337.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLII, p. 249.
[3] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLVI, p 504.

que par réflexion *diffuse* (2096), et il a constaté que la carthamine se comporte comme substance transparente avec les rayons rouges, pour lesquels elle est transparente, et comme un métal avec les rayons verts ou bleus. Ainsi, un faisceau polarisé par réflexion sur la carthamine, à 45° du plan d'incidence, et traversant un spath d'Islande perpendiculaire à l'axe suivi d'un polariscope, donne des anneaux à croix noire, avec la lumière rouge; mais les anneaux sont déformés avec la lumière verte ou bleue; ce qui indique une polarisation elliptique aussi marquée que celle des métaux. Par ce procédé, trop peu sensible pour montrer la polarisation elliptique quand elle n'est pas de l'ordre de grandeur de celle des métaux, M. Stokes a reconnu qu'un assez grand nombre de substances sont ainsi transparentes pour certains rayons, et réfléchissent les autres à la manière des métaux. Le fer oligiste semble former la transition entre les métaux et les substances analogues à la carthamine, il donne à peine la polarisation elliptique aux rayons rouges, pour lesquels il est un peu transparent, et l'imprime aux autres d'une manière d'autant plus prononcée qu'ils sont plus réfrangibles; cette substance est donc comme imparfaitement métallique pour les rayons rouges, et semblable aux métaux, pour les autres. On s'explique maintenant pourquoi le fer oligiste paraît bleu quand il réfléchit sous l'angle de polarisation, des rayons polarisés normalement au plan d'incidence, les rayons rouges manquant presque complétement.

III. Lumière polarisée dans la production des anneaux par les lames minces.

2475. Polarisation de la lumière des anneaux formés dans les lames minces. — Quand on observe les anneaux réfléchis formés entre deux lentilles (2288), à travers un prisme bi-réfringent dont la section principale coïncide avec le plan d'incidence, on remarque deux images de ces anneaux. Sous l'incidence perpendiculaire, elles ont même intensité; si l'angle d'incidence augmente, l'image *extraordinaire* s'affaiblit, devient nulle sous l'angle de polarisation du verre, et reparaît au-delà, en augmentant d'intensité. Pendant ce temps-là, l'image *ordinaire* ne varie pas. Si la section principale du prisme est perpendiculaire au plan d'incidence, c'est l'image ordinaire qui change d'intensité. Ces phénoménes, observés par Arago [1], s'expliquent facilement par la polarisation dans le plan d'incidence, des rayons réfléchis qui produisent les anneaux; les rayons polarisés dans le second azimut de l'analyseur, sont d'autant plus affaiblis que le faisceau réfléchi est polarisé en plus grande proportion dans le plan d'incidence. — Ces phénoménes peuvent s'observer, en appliquant simplement le prisme bi-réfringent sur le systéme des verres, de maniére que la lumiére les traverse avant d'émerger.

Les résultats sont les mémes pour les anneaux transmis; ce qui montre

[1] *Œuvres d'Arago* (Mémoires scientifiques), t. I, p. 5.



qu'ils sont polarisés par les réflexions aux deux surfaces de la lame mince, et que cette polarisation l'emporte sur celle que produit la réfraction. Du reste, il n'y a de polarisés que les rayons qui ont éprouvé ces réflexions; car, un objet placé sur la feuille de papier sur laquelle on projette les anneaux, donne deux images d'intensité constante pour toutes les positions de l'analyseur.

Anneaux entre une lame métallique et une lame de verre. — Arago ayant remplacé l'une des lames de verre par un miroir métallique, reconnut que les anneaux réfléchis produisent les mêmes phénoménes que ci-dessus ; seulement, l'image qui s'éteint présente, lorsqu'elle reparaît au-delà de l'angle de polarisation, des couleurs complémentaires de celles qu'elle avait auparavant, et si l'autre image représentait une tache noire, celle-ci présente une tache brillante. M. Ivory a expliqué ce résultat inattendu, en admettant que le rayon éprouve, en se réfléchissant à la première surface de la lame mince, un retard de $\frac{1}{2}\lambda$, qui d'aprés la théorie (2298), change, dans la lumière simple, les anneaux brillants en anneaux noirs, et *vice versâ*. Remarquons, en effet, que le rayon qui s'éteint est partiellement polarisé dans le second azimut ; sa vitesse de vibration est donc donnée par la formule de Fresnel, $v' = -\frac{\text{tang}\,(i-r)}{\text{tang}\,(i+r)}$ (2359). Or, au-delà de l'angle limite, on a $i+r > 90°$, et v' change de signe avec tang $(i+r)$; ce qui indique une différence de marche de $\frac{1}{2}\lambda$. Le rayon réfléchi à la seconde surface de la lame mince n'est pas dans le même cas ; car sa vitesse de vibration est $v' = -\frac{\text{tang}\,(i-r)}{\text{tang}\,(i+r)}$, expression dans laquelle r' est l'angle de réfraction dans la lame de métal. Or, cet angle étant beaucoup plus petit que r, parce que l'indice des métaux est extrêmement grand, $i+r'$ est moindre que 90°, de sorte que le changement de signe n'a pas lieu pour les rayons réfléchis à la seconde surface.

Comme vérification de cette explication, on forme des anneaux entre deux substances transparentes, dont la première est moins réfringente que la seconde. On fait en sorte que $i+r$ soit plus grand, et $i+r'$ moindre que 90°, et l'on trouve que la lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence donne des anneaux à centre blanc. Si la lumière incidente est naturelle, on voit, avec un prisme bi-réfringent, deux images, dont une à centre noir, et l'autre à centre blanc.

2476. Anneaux avec la lumière polarisée. — M. Brewster a étudié la formation des anneaux dans les lames minces, au moyen de lumière polarisée. M. Jamin a repris la question en détail, au moyen d'un appareil avec lequel on mesure les angles d'incidence et les azimuts du polarisateur et de l'analyseur[1]. Voici les principaux résultats auxquels il est arrivé :

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVI, p. 158.

1° Quand les rayons incidents sont polarisés dans le plan d'incidence, les anneaux réfléchis suivent les lois trouvées par Newton (2291).

2° Quand les rayons incidents sont polarisés exactement dans le second azimut, si l'on augmente graduellement l'angle d'incidence, l'éclat général diminue, les diamètres des anneaux augmentent jusqu'à une certaine limite, restent quelque temps stationnaires, puis diminuent rapidement jusqu'à l'angle de polarisation. En ce moment, la tache noire centrale a été remplacée par un espace éclairé; chaque anneau obscur a pris la place de l'anneau brillant qui le précédait, et les interférences ont été augmentées en chaque point, de $\frac{1}{4}\lambda$. — L'éclat augmente ensuite, pendant que les anneaux continuent à se resserrer, jusqu'à ce que le premier anneau noir se soit transformé en une tache centrale, comme si en chaque point, l'interférence avait augmenté de $\frac{1}{2}\lambda$, ou qu'on eût écarté les verres.

3° Quand les rayons incidents sont polarisés dans un azimut quelconque, les anneaux observés sont la superposition de ceux des deux cas précédents; et comme les phases et les intensités des rayons composants sont différentes, les rayons émergents sont en général polarisés elliptiquement. Le phénomène se présente alors sous des aspects très variés, et l'on peut obtenir des anneaux réfléchis à centre noir ou à centre blanc, suivant l'incidence et la position de l'analyseur. — Sous l'angle de polarisation, on peut, en imprimant à l'analyseur un mouvement continu de rotation, voir des anneaux naître au centre et s'accroître graduellement.

4° Les anneaux transmis présentent des phénomènes analogues, quand le plan primitif de polarisation n'est pas dans un des azimuts principaux.

Tous les résultats de l'expérience ont été comparés à ceux des formules de Cauchy, et ils se sont constamment trouvés d'accord. M. Jamin a observé d'autres phénomènes singuliers, dans le voisinage de la réflexion totale; il a vu les anneaux éprouver des déformations particulières. Dans la lumière homogène, les anneaux réfléchis se séparent en plusieurs séries d'anneaux distincts, résultant d'interférences d'un autre ordre. — Les anneaux transmis font place, sous la même incidence, à une infinité de bandes brillantes et obscures disposées sans ordre apparent. M. Jamin a donné l'explication générale de ces nouveaux faits; mais si l'on voulait leur appliquer l'analyse, on serait entraîné, sans doute, dans des calculs très compliqués.

CHAPITRE XIII.

ROTATION DU PLAN DE POLARISATION.

§ 1. — POLARISATION ROTATOIRE MOLÉCULAIRE.

I. Phénomènes. — Lois. — Théorie.

2477. Rotation du plan de polarisation par le cristal de roche. — En 1811, en même temps qu'il découvrait la polarisation chromatique, Arago reconnut que le cristal de roche présente des propriétés différentes de celles des autres cristaux à un axe. Tandis que des lames traversées par des rayons polarisés paralléles à l'axe, ne donnent jamais des couleurs dans l'analyseur, et conservent à cette lumiére son état et son plan de polarisation rectiligne, le cristal de roche perpendiculaire à l'axe fournit les nuances les plus vives, qui passent, quand on fait faire un demi-tour à l'analyseur, par la série des couleurs du spectre. Si l'analyseur donne deux images, elles présentent des couleurs complémentaires ; car, si elles empiétent l'une sur l'autre, les parties superposées sont blanches. Ces phénoménes s'observent facilement avec une plaque de quartz de 1 à 20^{mm} d'épaisseur placée dans l'appareil de Norremberg, ou dans l'appareil à projections traversé par la lumiére solaire ; dans ce dernier cas, ils sont trés brillants.

Arago reconnut à divers signes que le plan de polarisation des rayons simples traversant la plaque de quartz, est dévié d'une certaine quantité, *différente pour les divers rayons simples*, et allant en augmentant, des rayons rouges aux rayons violets. Un polariscope devra donc être tourné d'une maniére différente pour éteindre ces divers rayons. Il en résulte que, si l'on emploie la lumiére blanche, les rayons simples qui la composent seront éteints en proportion différente ; de là la couleur que présente leur mélange. Il est facile de voir que les intensités des mêmes rayons simples étant complémentaires dans les deux images, leurs couleurs seront aussi toujours complémentaires.

Biot a découvert par l'expérience les lois auxquelles est soumise la déviation ou *rotation du plan de polarisation* par le quartz [1] ; pour mesurer cette rotation, il cherchait de combien de degrés il fallait tourner un polariscope donnant l'obscurité en l'absence de la lame, pour éteindre de nouveau les rayons simples aprés qu'on l'avait interposée. Voici ces lois :

[1] *Mémoires de l'Institut, Académie des sciences* (1819), t. II, p. 41

1° La rotation du plan de polarisation produite par une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, est proportionnelle à l'épaisseur, elle reste la même quand on retourne la lame face à face, et quand on emploie des lames égales tirées de cristaux différents. Il n'y a plus de rotation, quand la lame est placée sur le miroir inférieur de l'appareil de Norremberg, le rayon la traversant deux fois en sens contraire.

2° Certains cristaux font tourner le plan de polarisation vers la droite (par le haut), d'autres vers la gauche, le rayon étant supposé s'avancer vers l'observateur. Les premiers sont dits *dextrogyres*, et les autres, *lévogyres*; et pour la même épaisseur, le déplacement angulaire reste toujours le même. Biot désigne les substances dextrogyres par le signe ↗, et les substances lévogyres par le signe ↘. Le sens de la rotation est généralement le même dans un même cristal de quartz. Cependant M. Brewster a trouvé, en 1819, des échantillons d'amétyste (quartz coloré en violet par le manganèse) qui présentaient des parties où la rotation avait lieu en sens opposé. M. Herschel a reconnu, en 1820, que la forme cristalline détermine le sens de la rotation, et que, dans la variété *plagièdre*, on peut la prévoir, d'après l'inclinaison de certaines facettes, comme nous le verrons plus loin (2503).

3° Quand on superpose plusieurs plaques, la rotation totale est égale à la somme algébrique des rotations particulières à chacune d'elles ; celles qui se font dans un sens étant prises de signe contraire à celles qui se font en sens opposé ; cette loi se vérifie, quel que soit l'ordre dans lequel les plaques sont placées, et quelles que soient leurs distances pourvu qu'elles restent parallèles.

4° L'angle de rotation correspondant aux couleurs simples, est à peu près proportionnel aux carrés des indices de réfraction, ou en raison inverse des carrés des longueurs d'ondulation (des carrés des longueurs d'accès dans le systéme de l'émission). Cette loi n'a pu être découverte qu'à force d'attention et de sagacité, à cause de la difficulté de retrouver exactement les mêmes nuances du spectre, dans les expériences successives, les raies de Fraunhofer n'étant pas alors connues. Voici les nombres donnés par Biot pour les déviations du plan de polarisation des divers rayons simples, dans une plaque de quartz de 1mm d'épaisseur. La première loi permet d'en déduire les déviations sous d'autres épaisseurs :

	Valeur de λ.	Déviation du plan de polarisation.
Rouge extrême	645	17° 29′ 47″
Rouge du verre de Biot	628	18 25 00
Limite du rouge et de l'orangé	596	20 28 47
Limite de l'orangé et du jaune	571	22 18 49
Jaune moyen	550	24 00 00
Limite du jaune et du vert	532	25 40 31
Limite du vert et du bleu	492	30 2 45
Limite du bleu et de l'indigo	459	34 34 18
Limite de l'indigo et du violet	439	37 51 58
Violet extrême	406	44 4 58

2478. Approximation de la quatrième loi. — D'aprés des expériences de M. Broch et de M. Wiedemann [1], faites par une méthode que nous indiquons plus bas (2480), la quatrième loi n'est qu'approximative. Le premier a mesuré les déviations des plans de polarisation des couleurs correspondantes aux raies principales du spectre, et en les multipliant par les carrés des longueurs d'ondulation données par Fraunhofer, il a trouvé des nombres qui croissent sensiblement avec la réfrangibilité des rayons. Voici les résultats :

Raies	B	C	D	E	F	G
Déviations	15°,30	17°,24	21°,67	27°,46	32°,50	42°,20
Produits par λ	723802	742950	751104	759574	762219	784152

M. Arndsten est arrivé, par la même méthode, à des résultats semblables.

L'essence de térébenthine et celle de citron ont, comme nous le verrons, la propriété de faire tourner le plan de polarisation, mais à un degré moindre que le quartz, en suivant les lois précédentes, et la quatrième se trouve encore notablement en défaut. En effet, M. Wiedmann a trouvé, en opérant sur des colonnes liquides de 1 décimètre d'épaisseur, pour l'essence de térébenthine, T, et l'essence de citron, R, les résultats suivants :

	Raies	C	D	E	F	G
T	*Déviations*	10°,9	14°,5	18°,7	23°,2	32°75
T	*Produits par λ*	4690	4871	5184	5471	6044;
R	*Déviations*	37°,9	48°,5	63°3	77°	106°
R	*Produits par λ*	1631	1683	1751	1823	1926

On voit que les produits croissent d'une manière notable. Nous verrons plus loin que la quatrième loi est indiquée approximativement par la théorie. Faut-il en conclure que celle-ci est en défaut, ou ne faudrait-il pas admettre plutôt l'existence de quelque circonstance inaperçue venant modifier les résultats de l'expérience ? C'est ce qui ne pourra être éclairci que par de nouvelles investigations. Nous verrons, du reste, que certains liquides repoussent complètement cette loi (2502).

2479. Couleurs avec la lumière blanche. — Les nombres du tableau de Biot permettent de calculer la teinte que donnera la lumière blanche pour chaque position du polariscope, avec une plaque de quartz d'épaisseur connue. En effet, la section principale de l'analyseur formant un angle β avec le plan primitif de polarisation, chaque rayon simple aura une intensité proportionnelle à $\cos^2(\alpha-\beta)$, ou à $\sin^2(\alpha-\beta)$, suivant qu'il s'agira de l'image ordinaire ou de l'image extraordinaire, α étant l'angle de rotation du plan de polarisation ; et il restera à calculer, par la régle de Newton (2060), la teinte formée par

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 119 et 121.

ces rayons mélangés en quantités proportionnelles à ces intensités. Biot a fait un grand nombre de calculs de ce genre, et les résultats ont été constamment d'accord avec l'expérience.

Teinte sensible. — Parmi les teintes qui se succèdent quand on fait tourner l'analyseur, Biot a remarqué dans l'*image extraordinaire*, la *teinte sensible*, ou *teinte de passage*, que l'on a observée depuis dans d'autres circonstances (2417). Dans le cas actuel, cette teinte se montre quand l'épaisseur du quartz n'est pas trop grande, quand il ne dévie pas le plan de polarisation des rayons rouges de plus de 140° à 150°. La teinte sensible n'est pas exactement la même pour toutes les épaisseurs ; elle est ordinairement bleu-violacé pâle, ou gris de lin, mais elle se reconnaît toujours facilement en ce que le moindre déplacement de l'analyseur la fait passer, d'un côté au bleu franc, et de l'autre au rouge vif. La teinte de passage, qui change évidemment de place avec le plan primitif de polarisation, se présente sous un angle de la section de l'analyseur avec ce plan, plus grand que l'angle qui donnerait le minimum d'éclat de l'image extraordinaire, avec la lumière simple. Si l'on considère la lumière rouge, les deux angles sont entre eux comme 30 : 23, quelle que soit l'épaisseur.

Ce rapport une fois connu, on peut se rendre compte des propriétés de la teinte sensible. Cherchons d'abord la longueur d'ondulation λ, qui correspond à la couleur de l'image ordinaire qui accompagne l'image extraordinaire présentant la teinte sensible. $\lambda' = 628$ étant la longueur d'ondulation du verre rouge, on aura, d'après la quatrième loi, $\lambda^2 : \lambda'^2 = 23 : 30$; ce qui donne $\lambda = 550$ millionnièmes de millimètre. Cette valeur de λ correspond à un jaune moyen placé vers le milieu du jaune du spectre. Si donc, la section principale de l'analyseur étant tournée de manière à donner la teinte sensible, on se servait ensuite de lumière de cette teinte jaune, l'image ordinaire présenterait son maximum d'éclat. Biot a ensuite calculé la teinte donnée par la lumière blanche dans l'image extraordinaire, en cherchant les déviations et les intensités des autres couleurs simples lorsque la section de l'analyseur est ainsi placée dans le plan de polarisation du jaune moyen ; ce qui se fait en retranchant de la déviation, 24°, de ce jaune, donnée par le tableau ci-dessus, les déviations des autres couleurs. Voici les résultats, en négligeant les secondes, la plaque de quartz ayant toujours 1mm d'épaisseur :

Rouge extrême	6° 30′	Limite du jaune et du vert	— 1° 40′
Rouge du verre de Biot	5 35	Limite du vert et du bleu	— 6 3
Limite du rouge et de l'orangé	3 31	Limite du bleu et de l'indigo	— 10 34
Limite de l'orangé et du jaune	1 41	Limite de l'indigo et du violet	— 13 52
Jaune moyen	0 0	Violet extrême	— 20 5

Chacun des rayons colorés se décompose, dans l'analyseur, en deux autres, l'un polarisé dans la section principale et donnant l'image ordinaire, d'in-

tensité $\frac{1}{2}\cos^2\beta$; l'autre polarisé à 90° du premier, donnant l'image extraordinaire, d'intensité $\frac{1}{2}\sin^2\beta$. La teinte sensible est formée de toutes les composantes extraordinaires. Or, comme les sinus augmentent en même temps que les angles, on voit que β étant très petit, la teinte sensible sera très faible, et sera composée principalement de bleu et de violet mêlés d'un peu de rouge et d'orangé. Si l'on vient à rapprocher le plan principal de l'analyseur, du plan de polarisation des rayons bleus, la composante du bleu diminuera en même temps que β, celle du rouge augmentera au contraire, et la teinte tournera au rouge. Si l'on tourne l'analyseur en sens contraire, le bleu dominera à son tour. Si l'épaisseur du quartz était plus grande que 1^{mm}, tous les angles devraient être multipliés par cette épaisseur, et la teinte sensible serait plus vive, un peu différente, mais le bleu y dominerait toujours mêlé d'un peu de rouge. Cette teinte ne change, du reste, notablement, que lorsque l'épaisseur est de 7 à 8^{mm} ; alors la déviation des couleurs les plus réfrangibles s'approchant de 18°, leur composante est très petite, tandis que la déviation des couleurs les moins réfrangibles est très près de 90°, c'est-à-dire de l'angle dont le sinus est maximum.

2480. Mesure de l'angle de rotation. — Au moyen de la teinte de passage, on peut, dans certains cas, trouver la déviation du plan de polarisation d'une manière plus précise qu'en cherchant le minimum d'éclat des rayons simples, dont l'intensité varie à peine dans le voisinage de ce minimum. Par exemple, pour vérifier la loi des épaisseurs, on cherchera la teinte de passage, avec des lames plus ou moins épaisses.

M. Broch a employé une autre méthode très précise [1], qui n'est autre chose que celle qu'avaient imaginée un an auparavant MM. Fizeau et Foucault, et dont nous avons parlé précédemment (2227) : les rayons solaires, entrant dans la chambre noire par une fente horizontale, sont polarisés par un prisme de Nicol, traversent suivant l'axe, la plaque de quartz dont on veut mesurer la rotation, et sont analysés par un second prisme de Nicol. Le faisceau émergent est ensuite reçu par un prisme de verre parallèle à la fente, et qui donne un spectre dans lequel on distingue les raies de Fraunhofer ; ces raies sont accompagnées de larges bandes noires, qui indiquent l'absence de certaines couleurs. Si l'on fait varier l'angle des sections principales des deux Nicols, on voit ces bandes se déplacer d'une extrémité du spectre à l'autre, les couleurs éteintes par l'analysenr changeant avec cet angle ; et l'on connaît la rotation imprimée par la plaque de quartz, au plan de polarisation de l'une des couleurs du spectre, quand on connaît l'angle des deux Nicols qui donne une bande obscure dans cette couleur. La plaque ne couvrant qu'une moitié de la fente, il est facile d'observer la déviation correspondante aux diverses raies de Fraunhofer, visibles dans la moitié du spectre non modifiée par le quartz. C'est par cette méthode que M. Broch a trouvé les résultats cités plus haut (2478). Chaque

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 119.

nombre est la moyenne de dix-huit observations faites avec des plaques d'épaisseur différente, dextrogyres ou lévogyres. L'erreur ne dépasse pas 0°,2, pour les raies C, D, E, et 0°,4 pour B, F, G, qui se trouvent dans la partie sombre du spectre. Les raies A et H sont dans une partie trop obscure pour donner des résultats précis ; il aurait fallu s'aider d'une petite lunette.

M. Wiedmann a employé, de son côté, une méthode à peu prés semblable : le spectre était observé à travers une lunette de Galilée à fil focal. Ce fil étant d'abord amené sur une raie, on tournait l'analyseur jusqu'à ce que le milieu d'une des bandes obscures vînt se placer sur le fil.

2481. Application aux polariscopes. — Une plaque de quartz perpendiculaire à l'axe, appliquée contre un analyseur, fait immédiatement distinguer la lumière polarisée, par la couleur qui se produit. Pour trouver le plan de polarisation des rayons incidents, on tourne l'analyseur jusqu'à ce qu'on trouve la teinte de passage. Ayant préalablement marqué la position de l'analyseur qui donne cette teinte quand le plan de polarisation est vertical, il est facile de déterminer, dans tous les cas, la position de ce plan.

Bi-quartz à deux rotations de M. Soleil. — M. Soleil a imaginé une disposition qui permet d'obtenir la position du plan de polarisation avec une extrême précision, et dont il a fait l'application à son saccharimètre (2501), et à l'horloge polaire (2214). La plaque de quartz a la forme d'un disque, composé de deux parties placées l'une à côté de l'autre, et réunies suivant un plan diamétral vertical. L'une des moitiés est dextrogyre, l'autre lévogyre. Toutes les deux donnent la teinte sensible dans la même position de l'analyseur, et sont alors parfaitement semblables. Si l'on vient ensuite à déplacer l'analyseur, même d'une quantité très petite, l'une des moitiés passe au rouge, tandis que l'autre vire au bleu, et il se manifeste ainsi une différence de nuance très facile à distinguer. Si l'on a marqué d'avance la position de l'analyseur qui donne la teinte de passage quand le plan de polarisation des rayons incidents est parallèle au diamètre de jonction des deux lames, il sera toujours facile de trouver la position de ce plan dans un cas donné.

M. de Sénarmont a remarqué que ce polariscope peut servir aussi à trouver la position des axes de l'ellipse dans les rayons polarisés elliptiquement. En effet, les deux moitiés ont la même teinte quand la section principale de l'analyseur contient un de ces axes ; chacune des vibrations composantes dirigées suivant ces axes produisant dans ce cas, pour sa part et indépendamment de l'autre, une teinte uniforme.

Le polariscope de M. Soleil peut servir à reconnaître les substances à polarisation rotatoire; car, si une semblable substance est placée dans le trajet de rayons polarisés, elle ajoute son épaisseur à la moitié du bi-quartz qui tourne dans le même sens qu'elle, et la retranche de l'autre moitié, les couleurs ne sont donc plus égales ; de plus, l'analyseur ne peut ramener simultanément les deux moitiés à la teinte sensible.

Quand le polariscope de M. Soleil doit être employé avec la lumière simple,

on cherche à obtenir l'égalité d'intensité des deux moitiés du disque ; mais le procédé n'est plus susceptible de la même précision. On emploie alors avec avantage l'instrument qui suit.

Polariscope de M. de Sénarmont [1]. — Imaginons une plaque de quartz perpendiculaire à l'axe, AB (*fig.* 1753), composée de deux prismes rectangulaires LD, L'D', appliqués l'un sur l'autre par la face hypothénuse. Chacun de ces prismes est lui-même formé de deux parties réunies dans la section *mn*. Tandis que les prismes D, D' sont dextrogyres, les prismes L, L' sont lévogyres. Cette plaque, suivie d'un analyseur et recevant normalement des rayons polarisés, paraîtra couverte de franges rectilignes parallèles aux arêtes des prismes. Si la section principale de l'analyseur est parallèle au plan primitif de polarisation, la frange centrale noire de l'image extraordinaire correspondra au milieu de la plaque, où les épaisseurs des prismes de rotation opposée sont égales. Mais si l'on fait tourner le plan de polarisation primitif, la frange centrale se déplacera parallèlement à elle-même, de manière à se rapprocher du sommet du prisme qui fait tourner dans le sens du mouvement. Il en résulte que les franges centrales se déplacent en sens contraire dans les deux moitiés DL', D'L de la plaque ; et pour en ramener les deux parties à être en ligne droite, il faudra tourner l'analyseur d'une quantité égale à la déviation du plan primitif de polarisation, et dans le même sens. Plus l'angle au sommet des prismes est aigu, plus les franges sont larges et écartées ; mais, comme elles sont alors diffuses, il vaut mieux les avoir plus serrées et plus nettes. Un angle de 12° avec l'axe, donne la même sensibilité que la double plaque de M. Soleil, quand on observe les franges à l'aide d'une petite lunette. Ce polariscope s'applique à la lumière simple comme à la lumière blanche. Il peut aussi servir à observer la polarisation elliptique, seulement les franges sont d'autant plus pâles que l'ellipse est moins allongée.

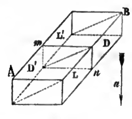


Fig. 1753.

2482. Anneaux colorés autour de l'axe du quartz dans la lumière convergente. — Quand on observe entre deux tourmalines croisées, les larges anneaux donnés par une lame de quartz perpendiculaire à l'axe (2432), on remarque que la croix noire manque totalement au centre, et ne se distingue un peu que sur les anneaux les plus éloignés. Au milieu, se trouve une plage colorée, dont la nuance dépend de l'épaisseur de la lame et de l'orientation de la tourmaline oculaire.

Pour expliquer ces résultats, rappelons-nous que la croix noire se montre dans le plan de polarisation du faisceau incident, quand il coïncide avec la section principale de l'analyseur (2434). Or, le plan primitif de polarisation

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 279.

étant dévié par le quartz, et d'une manière différente pour les diverses couleurs ; là où se formera la croix noire pour les rayons rouges, il y aura nécessairement de la lumière des autres couleurs ; leur plan de polarisation ne pouvant être dans la section principale de l'analyseur en même temps que celui des rayons rouges. Les anneaux sont formés par des rayons obliques à l'axe. Ces rayons ne sont plus polarisés circulairement, mais elliptiquement, et le rapport des axes est d'autant plus près de l'unité que l'on se rapproche davantage de l'axe. M. Airy a même démontré par le calcul et par l'expérience que, pour toutes les inclinaisons sur l'axe, le quartz donne aux deux rayons la polarisation elliptique, dextrorsum pour l'un, sinistrorsum pour l'autre. Pour l'un, le grand axe de l'ellipse est perpendiculaire, et pour l'autre parallèle à la section principale du cristal. L'ellipse se rétrécit d'autant plus que les rayons s'éloignent davantage de l'axe du cristal, et la polarisation devient rectiligne, quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe.

On conçoit que si la lame est très mince, la différence de rotation des plans de polarisation des diverses couleurs étant peu sensible, il se formera une croix colorée, mais elle ne s'étendra jamais jusqu'au centre ; de plus, il faudra, pour la voir, incliner la lame, à cause des grandes dimensions que prennent les anneaux quand elle est mince. M. Delezenne a remarqué que, pour les lames de quartz ayant de 1 à 5^{mm} d'épaisseur, la plage centrale n'est plus de couleur uniforme ; elle est occupée tantôt par une croix colorée, qui ne s'étend pas jusqu'aux premiers anneaux, et dont les branches sont d'autant plus courtes que la lame est plus épaisse, tantôt par quatre taches colorées. On peut toujours tourner la tourmaline oculaire de manière à obtenir une croix bleue, qui devient presque noire quand la lame est très mince.

Trouver le sens du cristal. — Si, après avoir obtenu la croix bleue, on fait tourner légèrement la tourmaline dans le sens de la rotation du cristal, la partie centrale passe au violet ; ce qui permet de reconnaître le sens de la rotation. Mais il est un autre moyen beaucoup plus commode : quand on fait tourner la tourmaline oculaire sur elle-même, si les anneaux s'agrandissent en paraissant naître successivement du centre, le cristal dévie le plan de polarisation dans le sens où tourne la tourmaline. Si, au contraire, les anneaux se resserrent en disparaissant au centre, le cristal dévie le plan de polarisation en sens contraire du mouvement imprimé à la tourmaline.

2483. Spirales d'Airy. — Deux lames de quartz de même épaisseur et de rotation inverse, étant superposées entre les deux tourmalines croisées, on aperçoit une croix colorée dont les bras, contournés en S, semblent se continuer avec les anneaux, qui affectent la forme de spirales, et présentent, ainsi que la croix, une teinte rouge-orangé du côté concave, et verte du côté convexe (*fig.* 1754). La croix ne change pas de position quand on fait tourner les plaques sur elles-mêmes, et son orientation dépend de l'épaisseur des plaques. Les bras courbes se dirigent en partant du centre, dans le sens de la plaque qui est en avant ; c'est donc la lame dextrogyre qui occupe cette position

pour le cas de la figure. Ces bras rencontrent les anneaux sur la croix noire ordinaire, qui se distingue un peu sur les anneaux éloignés du centre. Si l'on fait tourner la tourmaline oculaire, la croix tourne dans le même sens, en s'effaçant peu à peu, et est remplacée par une croix blanche quand les tourmalines sont parallèles.

On peut observer les spirales, avec une seule plaque de quartz posée sur la glace inférieure de l'appareil de Norremberg, en amenant la lentille mobile au-dessus. Il est évident que la lumière convergente réfléchie par la glace après avoir traversé la plaque, se trouve dans le même cas que si elle en traversait une seconde de rotation inverse.


Fig. 1754.

2484. Polarisation rotatoire dans divers solides. — Pendant longtemps on a regardé le cristal de roche comme le seul corps solide possédant le pouvoir de faire tourner le plan de polarisation. Depuis, on a constaté cette propriété dans diverses substances cristallisées ou non cristallisées. M. Descloiseaux [1] l'a reconnue dans les cristaux de cinabre ; car, ayant taillé une lame perpendiculaire à l'axe, il observa des anneaux sans croix au milieu, variant de grandeur quand il tournait l'analyseur. Ces cristaux sont lévogyres, ou plus rarement dextrogyres. Des macles formées de petits rhomboédres basés se pénétrant complétement en tournant autour d'un axe commun, lui ont donné les spirales d'Airy. La rotation est, du reste, 15 ou 16 fois moindre que celle du quartz, autant qu'on peut en juger avec des lames auxquelles leur couleur foncée laisse peu de transparence. Le *sulfate de strychnine* à 13 atomes d'eau, qui cristallise à froid en octaèdres à base carrée se clivant perpendiculairement à l'axe, donne aussi des anneaux sans croix noire au milieu. La déviation paraît être la moitié de celle du quartz. Tous les échantillons observés étaient lévogyres.

Cristaux du système régulier. — M. H. Marbach a découvert, en 1854, le pouvoir rotatoire dans les cristaux *du système régulier* : le chlorate et le bromate de soude, et l'acétate d'urane et soude. Ces substances font tourner, tantôt à gauche, tantôt à droite, 6,6 ; 8,6 ; et 13,5 fois autant que le quartz, et ces déviations suivent les mêmes lois que pour cette dernière substance. Il est à remarquer, de plus, que les résultats sont les mêmes, quelle que soit la direction suivant laquelle la lame a été taillée dans le cristal.

Les cristaux à deux axes ne peuvent manifester la polarisation rotatoire, à cause de leur grand pouvoir bi-réfringent, qui la masque. Cependant M. Biot a saisi quelques apparences non équivoques dans des lames de sucre cristallisé taillées perpendiculairement à l'un des axes optiques; il a vu la

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LI, p. 361.

bande noire qui traverse les anneaux (2438), colorée d'un manière sensible. Il a pu aussi constater directement la rotation, dans le sucre rendu incristallisable par la fusion, et dans la dextrine réduite en plaques transparentes.

2485. Pouvoir rotatoire des liquides. — Biot a découvert, en 1815, que divers liquides, entr'autres l'essence de térébenthine, dévient le plan de polarisation; découverte que faisait Seebeck, de son côté. Les huiles essentielles de citron, de laurier; la solution alcoolique de camphre, les solutions aqueuses de sucre, de dextrine, d'acide tartrique, des tartrates, possèdent aussi cette propriété, que Bouchardat a ensuite trouvée dans les solutions des alcalis végétaux et de leurs composés. Voici quelles sont les rotations du plan de polarisation des rayons rouges pour quelques liquides, sous une épaisseur de 1^{mm}; le signe (+) indique les substances *dextrogyres*, et le signe (—) celles qui sont *lévogyres*.

quartz	*essence de térébenthine* [1]	*solution alcoolique de camphre*	*essence de citron*	*sirop de sucre concentré*
± 18° 24′ 50″	— 16′ 16″	+ 1′ 5″	+ 26′ 10″	+ 33′ 14″

On voit que ces liquides dévient beaucoup moins que le quartz. Biot a constaté que les déviations suivent les même lois que pour ce dernier corps.

Pour expérimenter sur les liquides, on les renferme dans un tube de verre épais plus ou moins long, *t* (*fig.* 1755), fermé à chacune de ses extrémités par un disque de verre, *c*, s'appliquant exactement sur ses bords rodés avec soin. Le tube est enveloppé d'une gaîne en laiton, à l'extrémité de laquelle se visse un couvercle percé *aa*, qui serre le disque *c* contre l'extrémité du tube. Ce dernier se place entre un polarisateur et un analyseur. — On peut employer l'appareil de Norremberg, mettre le tube à la place de l'analyseur, qu'on enlève et qu'on porte au-dessus du tube. Quand on veut exécuter des mesures précises, on se sert de l'appareil suivant.

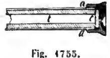


Fig. 1755.

2486. Appareil de Biot. — *bb′* (*fig.* 1756) est le tube plein de liquide. Il reçoit de la lumière polarisée par réflexion sur un miroir *m* en verre noir, dont on règle l'inclinaison au moyen de la vis V. En *p* est l'analyseur, qui peut tourner sur lui-même de quantités angulaires mesurées par le cercle gradué *r*. *l* est une petite lunette, à travers laquelle on observe les images colorées. On peut incliner le cercle gradué *r* autour du genou *o*, de manière à le placer perpendiculairement à l'axe du tube *bb′*. Pour cela, on remplace

[1] On trouve des variétés d'essence de térébenthine, non seulement présentant des rotations très différentes, mais encore des rotations en sens inverse. Cela tient à l'espèce de pin dont elles sont extraites, et aussi aux procédés par lesquels on les a préparées et épurées. Le nombre cité est relatif à l'essence ordinaire française.

momentanément ce tube par une fourchette à trois branches *f*, dont les extrémités sont dans un plan perpendiculaire à la colonne qui la porte, et avec lesquelles on fait coïncider le plan du cercle *r*. Le support de ce cercle est composé de deux parties rentrant l'une dans l'autre, et peut se déplacer latéralement et longitudinalement, au moyen des vis de rappel *v'* et *v*, de manière qu'il est facile de placer le centre du cercle *r* bien exactement sur l'axe du tube *bb'*. Ce tube repose dans une cornière ou gouttière *cc'*, liée au polarisateur *m*, par la pièce *d*. Toute la partie *mdc'* de l'appareil peut s'incliner plus ou moins en tournant autour du genou O. Des barres articulées *t*, *t'*, passant à travers des pièces de fer *u*, *u'* qui peuvent glisser au-dessus d'une

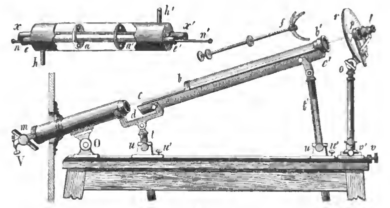


Fig. 1756. — 1/13.

fente longitudinale garnie d'une armature en fonte, servent à fixer l'appareil dans une position déterminée, au moyen des vis de pression *u*, *u'*, *u*, *u'*.

Pour observer, on fait passer la partie *m* de l'appareil, à travers le volet d'une chambre noire. On place la section principale de l'analyseur dans le plan d'incidence, puis on installe le tube, et l'on fait tourner l'analyseur jusqu'à ce que l'on obtienne de nouveau l'extinction d'une des images, si l'on opère avec la lumière rouge ; ou la teinte sensible si l'on se sert de lumière blanche, ce qui est beaucoup plus précis, mais il faut alors tenir compte du rapport entre les déplacements angulaires de l'analyseur qui correspondent à l'extinction dans la lumière rouge, et à la teinte sensible dans la lumière blanche.

Quand on veut opérer à différentes températures, on se sert d'un tube fixé dans une étuve cylindrique en laiton *hh'* (*fig.* 1756), dont on pose les extrémités *x* et *x'* sur les fourchettes qui terminent les barres *t*, *t*, après avoir enlevé la gouttière *cc'*. L'étuve est traversée par un courant de vapeur passant par les tubes *h*, *h'*, ou bien elle est remplie d'eau chaude qu'on agite au moyen des disques percés *a*, *a'*, mis en mouvement par la tige *nn'* qui passe à travers des boîtes à étoupes *e*, *e'*.

M. Soleil a simplifié l'appareil de Biot pour le cas où l'on veut qu'il soit portatif : l'analyseur et le polarisateur sont fixés à la gouttière cc', et tout le systéme est articulé par le milieu, à un pied unique sur lequel on peut l'incliner plus ou moins.

2487. Expérience sur la vapeur d'essence de térébenthine. — Biot a constaté, en 1818, que la propriété rotatoire peut exister dans l'état de vapeur. Mais comme les molécules sont alors trés écartées, il lui a fallu opérer sur une colonne de très grande longueur. L'appareil se composait d'un tube en fer-blanc, de 45 métres de longueur, fermé à ses extrémités par des glaces, et enveloppé d'un manchon ; le tout soutenu par des cordes tendues par des contre-poids, afin de maintenir le tube rectiligne, malgré les changements de température. A une extrémité était un miroir vertical en verre noir, renvoyant dans le tube la lumière d'une lampe, et à l'autre, l'analyseur mobile sur un cercle gradué. La vapeur d'essence venant d'une petite chaudière, fut d'abord introduite dans le manchon ; puis, quand le tube fut échauffé, on ouvrit des robinets, et elle passa dans ce tube, entrant par une extrémité et sortant par l'autre. Tant que le tube resta plein d'air, l'analyseur donna une seule image qui était blanche ; mais, dés que la vapeur eût rempli le tube, l'image blanche se colora, et l'autre apparut, avec la couleur complémentaire. Malheureusement, au moment où Biot allait mesurer la déviation du plan de polarisation, la chaudière éclata, une immense flamme s'éleva jusqu'au plancher supérieur, et occasionna un incendie qui exigea les secours publics. On voit par là de combien de précautions devront s'entourer les expérimentateurs qui voudraient répéter cette belle expérience.

2488. THÉORIE DE LA POLARISATION ROTATOIRE. — A peine les phénoménes de la polarisation rotatoire étaient-ils connus, que Fresnel en donnait l'explication, en les rattachant à sa belle théorie de la polarisation circulaire [1]. Il est parti pour cela d'un principe mathématique que nous allons d'abord exposer.

Décomposition d'un rayon polarisé en deux circulaires. — *Un faisceau polarisé dans un plan, peut être remplacé par deux circulaires d'intensité moitié moindre et de sens opposé.* Pour le démontrer, remarquons d'abord que deux rayons d'intensité i et i' polarisés dans le même plan, donnent (2421) un rayon résultant ayant pour intensité $I^2 = i^2 + i'^2 + 2\,i\,i \cos 2\pi \frac{d}{\lambda}$. Si les intensités sont égales, et le retard d égal à $\frac{1}{4}\lambda$, on aura $I^2 = 2i^2$; d'où $i = I : \sqrt{2}$. On peut donc remplacer le rayon d'intensité I par deux autres d'intensité $I : \sqrt{2}$ polarisés dans le même plan, et ayant une différence de phase égale à $\frac{1}{4}\lambda$. Cette différence doit être produite par le retard d'un des rayons, de $\frac{1}{8}\lambda$, et l'avance de l'autre de la même quantité, afin que le plan de polarisation conserve la même position que dans le rayon primitif.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVIII, p. 147.

Chacun de ces deux rayons d'intensité i, peut être remplacé à son tour par deux autres d'intensité $\frac{1}{2}\,i$ polarisés dans des plans formant des angles de 45° avec le plan primitif de polarisation ; ce qui fera en tout quatre rayons. Deux de ces rayons sont en avance de $\frac{1}{8}\lambda$, et les deux autres en retard de $\frac{1}{8}\lambda$. Un des rayons retardés de l'un des groupes, formera avec le rayon de l'autre groupe qui est polarisé dans un plan perpendiculaire, un rayon polarisé circulairement dans un certain sens. Les deux autres rayons formeront un polarisé circulaire de sens inverse ; car le rayon retardé se trouve alors dans le plan qu'occupait dans l'autre groupe le rayon avancé ; le rayon donné se trouvera donc ainsi remplacé par deux circulaires inverses.

Réciproquement, un systéme de deux rayons d'égale intensité polarisés circulairement en sens contraire, équivaut à un rayon polarisé dans un seul plan. On pourrait le montrer en répétant, dans l'ordre inverse, les raisonnements qui précédent ; mais on peut aussi faire voir directement qu'une molécule d'éther soumise à l'action des deux rayons, vibre dans une direction constante.

Soit O (*fig.* 1757) la molécule d'éther, et oa le rayon de la circonférence qu'elle tend à décrire dans les deux sens, à cause des deux rayons polarisés circulairement qui la sollicitent. Soit a la position qu'aurait à un instant donné cette molécule, sollicitée dans la direction $a\,\alpha$ par le mouvement circulaire qui réside dans un des rayons ; et $b\,\beta$ la direction de son mouvement au même instant, si l'autre rayon était seul. Pour avoir le sens du mouvement de la molécule soumise à la fois aux deux impulsions, il suffira de mener par le point O, des paralléles O α', O β' à $a\,\alpha$ et $b\,\beta$, et de chercher la résultante Or des vitesses dirigées suivant ces droites. Comme les vitesses suivant $a\,\alpha$ et $b\,\beta$ sont égales, puisque les deux rayons ont même intensité et même longueur d'ondulation, la droite Or divisera l'angle α'Oβ' en deux parties égales ; et comme cette droite aura toujours la même direction, quelles que soient les positions a et b considérées, on voit que la molécule vibrera suivant un diamètre constant, passant par le point c où se croiseraient les points a et b supposés tourner séparément dans les deux rayons circulaires. Le diamétre nc donne la direction du mouvement vibratoire dans le rayon formé par la réunion des deux circulaires. Le plan de polarisation sera donc perpendiculaire à nc, ou dirigé suivant le diamétre qui passe par les points où les deux mouvements sont paralléles et de sens contraire dans les rayons circulaires composants.

Fig. 1757.

2489. Cas de deux rayons circulaires marchant avec des vitesses différentes. — Supposons que deux rayons circulaires égaux, mais de sens contraire, pénétrent dans un milieu qui les propage avec des vitesses différentes. Il est facile de voir que les directions du mouvement vibratoire résultant, au lieu de rester dans un même plan, tourneront dans le sens du rayon qui se propage le moins rapidement. En effet, soit MN (*fig.* 1758) la face

d'entrée du milieu considéré, NE l'hélice suivant laquelle se propage un des ébranlements, constituant le rayon dextrorsum, et MD celle qui est décrite par un ébranlement correspondant à l'autre rayon, et supposons que ce dernier ait la plus petite vitesse de propagation. Les spires des deux hélices seront toujours parcourues dans le même temps, mais le pas 2ND sera plus petit que 2NH. Si maintenant nous considérons différentes sections du cylindre sur lequel sont tracées ces hélices, et si nous supposons, pour fixer les idées, que les deux hélices partant à l'entrée, d'un même diamétre MN, la direction du mouvement vibratoire soit perpendiculaire à MN ; en AB, cette direction sera la bissectrice $o\,\alpha$ de l'angle *mom'* ; en CD, la bissectrice $o'\beta$ de l'angle $no'D$; en EH, la droite $\gamma\, o''$.... On voit que cette direction tourne dans le sens du mouvement du rayon qui se propage le moins vite ; de sorte que la surface qui la contient n'est pas un plan, mais un héliçoïde. Si le rayon émerge en EH, la direction des vibrations ne changera plus et restera parallèle à $o''\gamma$; elle aura tourné d'une quantité évidemment proportionnelle à l'épaisseur Oo'' du milieu traversé, et il en sera de même du plan de polarisation, qui est perpendiculaire à $o''\gamma$.

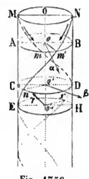


Fig. 1758.

Dans le cas où le rayon qui marche le plus rapidement est dextrorsum, comme dans la figure, le plan de polarisation tourne vers la droite, par le haut, quand le rayon marche vers l'observateur ; le milieu est alors *dextrogyre*. Si le rayon sinistrorsum avait la plus grande vitesse, le milieu serait *lévogyre*.

On peut calculer l'angle de rotation x quand on connaît les vitesses v et v' des deux rayons dans le milieu traversé, et l'épaisseur e de ce milieu. En effet, considérons une épaisseur E telle que les deux hélices rencontrent la surface de sortie, aux extrémités d'un même diamétre, comme à l'entrée ; alors la direction du mouvement vibratoire aura tourné de 180°, et comme elle tourne toujours d'une quantité égale à la moitié de l'arc dont un des systémes est en avance sur l'autre, on aura $x : 180 = e : E$. Or, E renferme un nombre entier m de pas égaux à λ ; on a donc $E = m\lambda = (m+1)\lambda'$, λ et λ' correspondant aux deux rayons dont les vitesses sont v et v'. Remplaçant E par $m\lambda$, puis m par sa valeur tirée de $m\lambda = (m+1)\lambda'$, il vient $x = 180\,\frac{(\lambda-\lambda')\,e}{\lambda'\lambda} = 180\,\frac{(v-v')\,e}{v'\lambda}$. On voit que x varie en raison inverse de $\lambda\lambda'$, et non de λ^2 ; ce qui montre que la quatrième loi (2478) n'est pas rigoureusement vraie, même en théorie.

Si x est connu, on tirera de la formule précédente $\frac{v}{v'} = \frac{\lambda}{\lambda'} = 1 + \frac{x}{180\,e}$, pour l'*indice de double réfraction circulaire*.

2490. Polarisation circulaire par double réfraction dans le quartz. — Supposons maintenant que le quartz posséde la propriété de propager, avec

des vitesses différentes, suivant son axe, des rayons polarisés circulairement en sens contraire ; il en résultera la déviation du plan de polarisation. En effet, un rayon polarisé devra se partager, à son entrée dans une lame perpendiculaire, en deux autres polarisés circulairement en sens contraire, ayant des vitesses différentes, et formant, à leur sortie, un rayon polarisé dans un plan qui fera avec le plan primitif de polarisation, un angle proportionnel à l'épaisseur traversée. Si le rayon incident était polarisé circulairement, il passerait sans se modifier.

Double réfraction du quartz suivant son axe. — La simplicité de l'explication qui précède pourrait être regardée comme une preuve *à posteriori* de l'inégalité de vitesse des deux circulaires inverses, dans le quartz. Mais Fresnel a donné de ce fait une preuve directe. Il taille le cristal en forme de prisme, afin que la différence de vitesse puisse se manifester par une différence de déviation (2230) ; et comme la différence des indices ne porte que sur les cent-milliémes, il emploie la disposition suivante : ABC (*fig.* 1759) est un prisme, de 152°, compris entre deux autres, rectangulaires, ABD, ACE, taillés dans un cristal qui tourne le plan de polarisation en sens inverse du prisme ABC. Un rayon polarisé entrant normalement à la face EC, se divise, en *n*, en deux rayons, qui s'écartent encore en *a* et *c*, et donnent deux faisceaux émergents *e*, *e'* doués de toutes les propriétés de rayons polarisés circulairement. De plus, si on les reçoit dans un des parallélipipèdes de Fresnel (2464), ils sont restaurés, et leurs plans de polarisation sont à 45° du plan d'incidence dans le parallélipipède ; mais pour l'un, l'angle est à droite, et pour l'autre à gauche, ce qui prouve que les deux rayons circulaires étaient de sens inverse. Du reste, tantôt c'est le rayon le plus écarté du sommet A qui est dextrorsum, tantôt le moins écarté, suivant les échantillons ; c'est pour cela qu'ils sont tantôt dextrogyres, tantôt lévogyres.

Fig. 1759.

Voici ce qui se passe dans cette expérience : le rayon polarisé se décompose à son entrée en *n*, en deux autres polarisés circulairement en sens contraire, de vitesse différente, et superposés. En arrivant en *a*, celui qui possède la plus grande vitesse passe dans un milieu qui lui donne, au contraire, la plus petite vitesse ; il est donc dans le cas d'un rayon entrant dans un milieu plus réfringent, et est dévié vers la base CB. L'autre rayon prenant la vitesse la plus grande en passant dans le prisme ABC, se comporte comme s'il pénétrait dans un milieu moins réfringent, et se relève vers le sommet ; les deux rayons sont donc séparés. Le même effet se produit à l'entrée dans le prisme ABD, dont le sommet est en bas ; ce qui augmente l'angle des rayons émergents. — Il est essentiel que les rayons passent suivant l'axe ; car, dés qu'ils s'en écartent un peu, ils éprouvent la double réfraction, beaucoup plus énergique, que le quartz exerce obliquement à son axe.

Les deux faces DB, EC du *tri-prisme* étant parallèles, le systéme est

achromatique. Or, les rayons émergents sont colorés ; on doit donc attribuer ce résultat à l'inégalité de double réfraction des divers rayons simples. C'est ainsi que Fresnel a vérifié ce qu'il avait annoncé dès 1818, que la double réfraction circulaire est bien plus énergique sur les rayons violets que sur les autres ; nous savons, en effet, que la rotation du plan de polarisation par le quartz, augmente avec la réfrangibilité des rayons.

2491. Double réfraction des liquides doués du pouvoir rotatoire. — Aprés la découverte de la déviation du plan de polarisation par l'essence de térébenthine, Fresnel a prouvé l'existence de la double réfraction dans ce liquide, et a pu dés lors lui appliquer la théorie qu'il venait d'établir pour le quartz [1].

1° Fresnel observa obliquement sous l'angle de polarisation, des anneaux colorés formés entre une plaque de verre et un prisme un peu convexe ; il interposa dans le faisceau réfléchi une colonne d'essence de près de 2 mètres, et le nombre d'anneaux n'augmenta pas. Ayant ensuite placé un prisme bi-réfringent dans la lunette à travers laquelle il observait, il vit deux images, présentant beaucoup plus d'anneaux qu'auparavant. Les nouveaux anneaux ne peuvent s'expliquer qu'en supposant une diminution dans la différence de marche des rayons réfléchis aux deux surfaces de la lame mince ; c'est-à-dire en admettant qu'une partie A des rayons réfléchis à la première surface de cette lame a marché dans le liquide, un peu plus lentement qu'une partie B de ceux qui sont réfléchis à la seconde surface, pour donner lieu aux nouveaux anneaux dans une des images ; tandis que la partie A′ des premiers rayons marchait un peu plus vite que la partie B′ des autres, et donnait lieu aux nouveaux anneaux de l'autre image. A doit être sensiblement égal à A′, et B à B′. Arago avait obtenu des résultats semblables, en employant une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, au lieu d'une colonne d'essence.

2° La lumière polarisée par une pile de glaces, traverse le tube d'essence, et vient se réfléchir sur les plaques de Brewster (2308). Au lieu d'un seul système de franges, on en distingue, avec une loupe, trois différents. Le premier, le plus intense, est formé par le concours des rayons qui ont subi la même réfraction dans l'essence ; les deux autres par le concours de ceux qui ont été réfractés différemment.

2492. De la cause première de la polarisation rotatoire. — Il semble naturel d'admettre que l'arrangement régulier des molécules dans le quartz et certains autres cristaux, est la cause de la différence de vitesse des deux polarisés circulaires, d'où résulte la rotation du plan de polarisation ; et ce qui confirme cette manière de voir, c'est que les prismes de quartz brisés transversalement présentent toujours une surface héliçoïdale présentant des échelons autour de l'axe de figure, comme un escalier tournant. En outre, le quartz amorphe, le cristal de roche qui a été rendu tel par fusion, le chlorate

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVI, p. 172.

de soude fondu ou dissous dans l'eau, perdent leur pouvoir rotatoire. Mais s'il en est ainsi pour quelques cristaux, il est d'autres substances chez lesquelles l'arrangement des molécules, loin d'être l'origine de la polarisation rotatoire, est, au contraire, un obstacle à sa manifestation ; et il faut, avec Biot, chercher la cause du phénomène dans l'action individuelle des molécules de la substance. C'est ainsi que nous venons de voir des liquides et même des vapeurs, dont les molécules n'ont pas d'arrangement particulier, dévier le plan de polarisation. Biot a pu même faire tourner, par un mouvement d'horlogerie, un diaphragme dans un tube rempli d'essence, et avec une vitesse assez grande pour qu'il n'interceptât pas la lumière, sans que la teinte sensible donnée au polariscope fût altérée pendant l'agitation du liquide. Dans les cristaux, l'arrangement des molécules ne fait souvent qu'entraver l'action, que la déguiser ; aussi, le pouvoir rotatoire s'observe-t-il plus facilement dans ceux du système régulier. Le sucre cristallisé donne à peine des signes de rotation, tandis que, rendu amorphe à l'état de *sucre d'orge* par la fusion, il agit fortement, et encore mieux et dans le même sens quand il est en dissolution dans l'eau. Le camphre, qui, dissous dans l'alcool ou l'acide acétique, présente un pouvoir énergique, est tout-à-fait inactif à l'état de lames cristallisées obtenues par la sublimation lente à la température ordinaire.

Il y a des substances chez lesquelles l'action individuelle des molécules peut être accompagnée, quand elles sont solidifiées, d'une influence provenant de l'arrangement régulier. C'est ainsi que le sulfate de strychnine présente à l'état solide, d'après M. Descloizeaux, un pouvoir rotatoire 24 ou 25 fois plus grand qu'à l'état de dissolution, lorsque, dans les deux cas, les rayons lumineux rencontrent dans leur trajet le même nombre de molécules.

On peut donc diviser les corps, relativement au pouvoir rotatoire, en trois classes : 1° les solides, qui, cristallisés dans un système autre que le système régulier, doivent leur propriété à l'arrangement des molécules, comme le quartz, le chlorate de soude ; 2° ceux qui la doivent à la structure même de leur molécule, comme les essences, certains corps en dissolution. Il est à remarquer qu'ils contiennent toujours un élément organique ; 3° ceux dans lesquels l'action individuelle des molécules est accompagnée, dans l'état solide, d'une autre action provenant de l'arrangement régulier des molécules, comme le sulfate de strychnine. Nous allons considérer à part les déviations produites par l'action individuelle des molécules.

2493. LOIS DE LA POLARISATION ROTATOIRE MOLÉCULAIRE. — Quand l'effet n'est dû qu'à l'influence individuelle des molécules, et que ces molécules n'éprouvent pas de modifications de structure pendant les expériences, l'angle de rotation du plan de polarisation est proportionnel au nombre des molécules placées sur le trajet des rayons lumineux, quelle que soit la distance à laquelle elles peuvent être portées par l'effet de la chaleur, ou de divers dissolvants inactifs. Biot, qui a découvert cette belle loi, a fait de nombreuses expériences pour la démontrer, dans les substances où l'arrangement des particules ne concourt

en rien à l'effet produit [1]. Par exemple, ayant rempli d'essence un tube traversé par la lumière polarisée, il a vu la couleur observée dans une certaine position de l'analyseur, rester la même à —10° et à 100°, pourvu que les colonnes liquides eussent des longueurs en raison inverse des densités aux deux températures. — Si l'on mêle l'essence de térébenthine avec différentes huiles grasses, ou avec de l'éther, en remplissant en partie le tube, de cette essence, achevant de remplir avec l'autre liquide et mélangeant, la couleur reste la même qu'avec l'essence seule. — Les essences de térébenthine et de citron mélangées en quantités poportionnelles aux déviations inverses qu'elles font subir au plan de rotation de la lumière rouge, donnent un mélange complétement inactif. — Le camphre artificiel, formé par la combinaison de l'essence de térébenthine et de l'acide chlorhydrique, qui est inactif, étant dissous dans l'alcool, a produit dans la lumière rouge une déviation à gauche, de 24°; le calcul, d'après la densité de l'essence seule dans la combinaison, donne 26° 36′, nombre peu différent. Ce camphre artificiel dissous dans l'essence, a donné aussi la même rotation que l'essence contenue dans le camphre, réunie à celle qui le dissout.

Nous devons ajouter que les résultats ne sont pas aussi nets qu'on l'avait cru d'abord, et que les exemples que nous venons de citer ne vérifient la loi que d'une manière approximative. Cette loi doit donc être considérée comme une loi limite, qui n'est probablement satisfaite par aucune substance, les molécules actives éprouvant toujours, lorsqu'on les met dans différentes conditions ou en présence de dissolvants, quelques légères modifications dans leur structure intime, ou formant avec le dissolvant des groupes moléculaires variables avec les proportions de ce dernier. Mais pour savoir au juste à quoi s'en tenir sur la loi de Biot, il faut considérer avec lui ce qu'il nomme le *pouvoir rotatoire moléculaire* ou *spécifique*.

2491. Evaluation du pouvoir rotatoire moléculaire. — Biot nomme *pouvoir rotatoire moléculaire* ou *spécifique* d'une substance, la déviation du plan de polarisation qu'elle produit sous une épaisseur égale à l'unité, et en supposant sa densité ramenée à l'unité par une modification convenable de la distance de ses molécules. Pour évaluer ce pouvoir, considérons une substance de densité d, et déviant le plan de polarisation des rayons rouges, de α sous l'épaisseur l. Le pouvoir spécifique ρ sera,

$$\rho = \frac{\alpha}{dl} \, ;$$

d'après les lois ci-dessus. S'il s'agit d'une dissolution dans un liquide inactif, d représentera la densité de la substance active dissoute. Cette densité se calcule facilement, quand on connaît le poids de cette substance et celui du dissolvant ; car, en appelant p et π ces poids, δ la densité de la dissolution et

[1] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. X, p. 5, 175 et 307.

d celle de la substance active sous le volume v de la dissolution, on aura $d = p : v$. Or, on a aussi $v = \frac{p+\pi}{\delta}$; donc, $d = \frac{p\delta}{p+\pi}$. Remplaçant d par cette valeur, dans la formule précédente, il vient

$$[1] \qquad \rho = \frac{\alpha\,(p+\pi)}{lp\delta}\ ; \qquad \text{d'où } \alpha = \rho\,\frac{lp\delta}{p+\pi}. \qquad [2]$$

La formule [2] donne, en fonction de ρ, la déviation α produite par une colonne l de la substance, mêlée avec une substance inactive, dans la proportion de p à π, en poids ; la densité du mélange étant δ.

2495. Mélanges. — Si l'on a deux substances actives mélangées, ne modifiant pas mutuellement leur action rotatoire, on calculera séparément les déviations de chacune d'elles comme si elle était seule, et on les ajoutera ou on les retranchera suivant qu'elles agissent dans le même sens, ou en sens contraire. Soient α et α' les déviations produites par l'unité de longueur des deux dissolutions ayant les densités δ et δ' ; p, p' les poids de ces dissolutions formant un mélange pesant P et ayant la densité D. Soit enfin L la longueur de la colonne de mélange traversée par la lumière ; on aura, pour la déviation produite x,

$$x = \frac{\mathrm{LD}}{\mathrm{P}}\left(\frac{\alpha}{\delta}\,p \pm \frac{\alpha'}{\delta'}\,p'\right) = \frac{\mathrm{LD}}{\mathrm{P}}\,(\rho p \pm \rho' p')\,;$$

car on a $\alpha = \rho\delta$, et $\alpha' = \rho'\delta'$. — Si l'on veut que les deux dissolutions se neutralisent, quand elles agissent en sens inverse, il faut que l'on ait $\alpha p : \delta = \alpha' p' : \delta'$; ou en appelant v et v' les volumes mélangés, et remplaçant p par $v\delta$ et p' par $v'\delta'$, $\alpha v = \alpha' v'$; ce qui exprime que les dissolutions doivent être mélangées en volumes réciproquement proportionnels aux déviations qu'elles produisent séparément sous l'unité de longueur. Biot a vérifié ce résultat avec les rayons rouges, sur des mélanges d'essence de térébenthine et d'essence de citron ; et sur des mélanges de sirop de sucre ordinaire, qui tourne à droite, et de sirop de sucre rendu lévogyre par l'action de l'acide chlorhydrique, et désigné sous le nom de *sucre interverti*.

En mesurant le pouvoir rotatoire spécifique d'une même substance sous différents états, à différentes températures, dissoute, ou combinée, on pourra reconnaître si les molécules ont, dans ces différentes circonstances, été altérées dans leur constitution, ou, dans le cas de corps solides, si elles ont éprouvé un arrangement différent. Si le pouvoir rotatoire n'a pas changé, c'est que les molécules n'ont été modifiées ni dans leur structure, ni dans leur arrangement. Dans le cas contraire, il y a eu des modifications permanentes ou passagères. Voici quelques applications de cette méthode.

2496. Effets de la chaleur sur le pouvoir rotatoire. — Le pouvoir spécifique du cristal de roche augmente par la chaleur (de 108° à 109°,5 environ pour un échauffement de 70°). Les molécules changent donc de position

relative ; comme nous le savions, du reste, car ce cristal se dilate d'une manière différente parallélement et transversalement à l'axe (II, 839).

L'essence de térébenthine n'est pas dans le même cas ; car, à 55°, et même quand elle est congelée, elle conserve sensiblement le même pouvoir qu'à 10°. Toute la chaleur est donc employée à écarter les molécules, aucune partie sensible ne pénétrant dans leur intérieur pour en modifier la structure, et la solidification ne leur donne pas d'arrangement régulier.

L'acide tartrique en dissolution dans l'eau présente un pouvoir moléculaire qui croît avec la température et reprend sa valeur primitive quand elle revient à son premier point. Laurent a indiqué le moyen de fondre cet acide solide, sans perte d'eau, en masses solides amorphes et transparentes, et Biot a reconnu que, sous cet état, la chaleur a aussi une influence marquée sur le pouvoir rotatoire, qui agit vers la droite, à 20°, diminue ensuite avec la température, devient nul, puis a lieu vers la gauche, à 3° ; sous l'épaisseur de $0^m,07$, la déviation est alors de — 3°,3 pour les rayons rouges.

Le pouvoir spécifique des sels de quiniue augmente aussi notablement et d'une manière passagère, pour des températures qui ne dépassent pas celles de l'atmosphère. Les dissolutions de sucre de raisin et d'une foule d'autres substances éprouvent des variations analogues.

II. Applications de la polarisation rotatoire moléculaire.

2497. Applications à l'étude des dissolutions. — Biot a tiré parti de la polarisatiou rotatoire, pour déterminer l'état dans lequel se trouvent les molécules d'une substance active dissoute dans un liquide inactif, état que la chimie est, dans la plupart des cas, impuissante à découvrir. On peut distinguer à cet égard quatre cas :

1° Il peut arriver que les dissolvants ne fassent qu'écarter les molécules des corps dissous, sans se combiner avec elles et sans en modifier les propriétés. Alors la valeur du pouvoir reste la même à l'état solide et à l'état de dissolution, quelle que soit la quantité du dissolvant.

2° Le dissolvant inactif employé en petite quantité, peut produire son maximum d'effet sur une partie des molécules, soit en se combinant avec elles, soit en étant simplement retenu par elles en modifiant leur action sur la lumière. Si l'on augmente la quantité du dissolvant, le nombre des molécules ainsi modifiées augmentera, et la valeur de ρ variera d'une manière continue, jusqu'à ce que toutes les molécules aient éprouvé la même altération ; alors, une plus grande quantité de dissolvant ne modifiera plus le pouvoir spécifique, et le composé formé rentrera dans le premier cas ; mais il s'en distinguera facilement, en ce que la valeur de ρ variera avec la nature du dissolvant. En ajoutant de la substance dissoute, avant d'arriver à cette limite, on modifiera la

valeur de ρ d'une quantité que l'on pourrait calculer au moyen du pouvoir moléculaire propre à cette substance (2494).

3° Toutes les molécules peuvent être partiellement et également affectées par le dissolvant employé en petite quantité ; leur altération augmente avec cette quantité d'une manière continue, jusqu'à ce qu'elles aient toutes subi le maximum de modification de la part du liquide. ρ varie donc encore d'une manière continue, pour rester ensuite constant. En ajoutant de la substance dissoute, la valeur de ρ serait modifiée d'une manière qui dépendrait d'un pouvoir moléculaire différent de celui qui est propre à la substance pure.

4° Enfin, il peut arriver que le dissolvant, aprés s'être combiné avec toutes les molécules, ne fasse que les diluer, ce qui laisserait ρ constant, jusqu'à ce que la quantité en soit suffisamment augmentée, auquel cas il formerait une nouvelle combinaison, d'après la loi des proportions multiples de la chimie ; alors ρ changerait brusquement de valeur, pour rester de nouveau constant, jusqu'à ce qu'il se forme une nouvelle combinaison définie.

2498. Application à divers cas. — Biot a reconnu que le premier cas paraît être un cas idéal qui n'est jamais réalisé rigoureusement [1]. Les substances qui y rentrent approximativement sont toutes organiques ; telles sont l'essence de térébenthine dissoute dans l'alcool ou les huiles, ou combinée avec l'acide chlorhydrique ; la gomme, le camphre dissous dans l'eau, l'alcool ou l'éther. Le pouvoir rotatoire de ces substances s'accroît légérement avec la quantité de dissolvant, excepté pour le camphre, qui donne une diminution. Biot a trouvé que le sirop de sucre de cannes éprouve une légère augmentation, mais trés faible ; car, des expériences très précises de M. Arndtsen, faites au moyen de la méthode de M. Broch (2480), ont donné les mêmes valeurs de ρ pour des dissolutions contenant 0,3, 0,4 et 0,6 de sucre, et en opérant sur les rayons colorés correspondant à cinq des principales raies du spectre. Biot a pu reconnaître, toujours par la même méthode, que la modification moléculaire produite par le dissolvant, demande quelquefois un temps trés long pour être compléte ; c'est ainsi que le pouvoir des dissolutions d'essence dans l'alcool ou les huiles, augmente encore sensiblement après plusieurs mois. Ainsi, pour la plupart des substances actives, les molécules sont impressionnées par celles du dissolvant, et l'on peut regarder ces substances comme formant avec lui, des systèmes liquides dont toutes les molécules sont dans un état actuel de combinaison, déterminé par leur mutuelle présence et sans proportions définies. Cette conclusion est surtout confirmée par les propriétés de l'acide tartrique, chez lequel les phénoménes sont tellement prononcés, qu'ils ont conduit Biot à reprendre ses expériences sur les autres substances, et à généraliser des propriétés qui paraissaient d'abord n'appartenir qu'à cet acide.

Acide tartrique. — Cet acide nous présente un exemple remarquable du

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXVI, p. 257.

troisième cas [1]. Biot a étudié des dissolutions de ce corps dans l'eau, l'alcool et l'esprit de bois, et il a trouvé que la valeur de ρ augmente rapidement. Tandis qu'elle n'est que de 4°,6 pour 0,4 d'eau, elle devient 12°,37 pour 0,95 de ce liquide. Biot a représenté les résultats de ses expériences par la formule $\rho = A + Be$, dans laquelle e représente la proportion de dissolvant, B une constante qui dépend de sa nature, et A une autre constante, la même pour tous les dissolvants, croissant avec la température, et qui représente le pouvoir moléculaire propre à l'acide seul. Cette formule représente une ligne droite, et les valeurs des constantes sont telles, qu'elle fait un angle très petit avec l'axe sur lequel on porte les valeurs de ρ. Aussi Biot a-t-il soupçonné que cette droite n'était que la tangente initiale de la courbe qui exprime la loi ; il a alors posé $\rho = A + \frac{Be}{e+C}$, équation qui donne des résultats d'accord avec ceux de l'expérience, et qui représente une hyperbole équilatère ayant ses asymptotes parallèles aux axes des coordonnées. Il résulte de là que le pouvoir spécifique des dissolutions d'acide tartrique augmente indéfiniment avec la quantité d'eau. Chaque proportion de ce liquide correspond donc à une modification incomplète de toutes les molécules du liquide ; ou, en d'autres termes, « l'acide, en quelque faible proportion qu'il soit, impressionne toute la masse d'eau mise en sa présence. »

Biot a aussi étudié les mélanges de solutions aqueuses d'*acide tartrique* avec des proportions variables d'*acide borique*, qui est inactif. Il a reconnu que les pouvoirs du mélange augmentent rapidement avec les quantités du dernier acide. Par exemple, la solution contenant 25 pour cent d'acide tartrique, et donnant $\rho = 9°,87$, ayant reçu 0,0018 d'acide borique, a donné $\rho = 11°,05$; et avec la proportion 0,049, $\rho = 37°,35$. Les courbes représentant les variations de ρ comparées à celles des quantités d'acide borique, sont encore des hyperboles équilatères. — L'acide borique peut être mêlé à l'acide tartrique à l'état solide : on les fait fondre et l'on coule le mélange dans des vases chauds, où il se solidifie sans cristalliser : et l'on trouve aussi que ρ augmente rapidement d'une manière continue avec la proportion d'acide borique.

Alcaloïdes dissous dans les acides. — Les alcalis végétaux dissous dans les acides ont donné à M. Bouchardat des résultats variés [2]. Tandis que la *morphine* mêlée aux acides, possède le même pouvoir moléculaire que lorsqu'elle est dissoute dans l'eau, ce qui permet d'admettre que ses molécules ne sont pas altérées, la *narcotine*, lévogyre avec l'eau, l'alcool ou l'éther, devient dextrogyre avec les acides ; interversion remarquable, qui prouve que ses molécules sont modifiées par le contact des acides. De plus, l'altération est permanente ; car, si l'on chasse l'acide au moyen de l'ammoniaque, on retrouve

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. X, p. 385 ; t. XI, p. 82 ; et *Mémoires de l'Académie des sciences de Paris*, t. XVI.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. IX, p. 213.

bien dans la dissolution filtrée la rotation à gauche, mais elle est moins prononcée qu'auparavant.

La *strychnine*, la *brucine*, dissoutes dans l'alcool ou l'eau légèrement acidulée, tournent à droite, et la *cinchonine* à gauche. Les acides diminuent l'action, mais d'une manière passagère, car elle reprend sa première énergie quand on chasse l'acide au moyen d'une base. L'ammoniaque combinée à la *brucine* en augmente un peu le pouvoir rotatoire.

Les dissolutions de *quinine* sont toutes lévogyres, et les acides augmentent passagèrement leur pouvoir spécifique. La solution concentrée de sulfate de quinine dans l'eau aiguisée d'acide sulfurique, donne $\rho = -192°,95$, à la température de 21°. En partant de ce nombre, on pourra reconnaître par une opération rapide, l'état de pureté de ce sel si souvent falsifié.

2499. Applications à la chimie. — On voit que le pouvoir rotatoire donne sur l'état chimique de certains composés, des indications que l'analyse ordinaire ne pourrait fournir ; car celle-ci ne fait connaître, en général, que les éléments et leurs proportions, sans tenir compte de leur mode d'arrangement. Biot a donc doté la mécanique chimique d'une méthode très précieuse qui permet de pénétrer jusqu'à un certain point, dans la constitution moléculaire des composés dont un des éléments exerce le pouvoir rotatoire. Cette méthode, appliquée par Biot et par différents physiciens, a déjà conduit à un grand nombre de résultats importants. Citons quelques exemples.

Par cette méthode, on a pu suivre pas à pas les transformations que subissent certains composés organiques, comme la transformation des fécules, de la gomme en sucre sous l'influence des acides étendus. — On peut distinguer les uns des autres les sucs de différents végétaux. — Le sucre de raisin est dextrogyre quand il est frais ; mais s'il s'est une fois solidifié, sa dissolution dans l'eau est désormais lévogyre : il a donc éprouvé une modification moléculaire que les méthodes ordinaires de la chimie n'auraient pu indiquer. — On reconnaît que la dissolution aqueuse de gomme, qui tourne de 12° à droite, tourne de 22° à gauche après avoir été traitée par les acides étendus. Le sucre de cannes tourne de 42° à droite, et de 15° à gauche après avoir été interverti par les acides. La dextrine, qui tourne à droite, comme le rappelle son nom, se transforme en sucre par l'acide sulfurique faible, et son pouvoir rotatoire diminue, et passe de 60° à 30° environ. Celui du sucre de lait, sous la même influence, augmente, au contraire, de 16° à 20°.

On a pu suivre pas à pas, par le même procédé et d'après les quantités de sucre contenues, les transformations que subissent les sucs des végétaux en passant des racines dans la tige et les feuilles, et redescendant vers les racines ; les changements des fruits à mesure qu'ils approchent de l'état de maturité. On a pu également, en évaluant la quantité de sucre contenue dans les urines des malades affectés du diabète sucré, ou glucosurie, constater l'existence et suivre les phases de cette cruelle maladie. Bouchardat a fait, à l'Hôtel-Dieu de Paris, un grand nombre d'observations sur ce sujet.

Enfin, les substances *isomères*, c'est-à-dire composées des mêmes éléments dans les mêmes proportions, peuvent se distinguer les unes des autres par leur pouvoir rotatoire. Par exemple, l'acide tartrique et les tartrates tournent à gauche, l'acide paratartrique et ses sels n'ont pas de pouvoir rotatoire.

2500. Application à la saccharimétrie. — Le pouvoir rotatoire des dissolutions sucrées a fourni à Biot une méthode rapide et sûre de reconnaître la proportion de sucre de cannes renfermée dans une dissolution, même quand ce sucre est mélangé avec d'autres espèces dont le pouvoir rotatoire est différent du sien. On doit à M. Clerget un Mémoire sur l'emploi de cette méthode, qu'il a appliquée à l'étude comparative des jus de canne à sucre et de betterave venant de différentes provenances, du jus de raisin, des sucres bruts, des mélasses, etc. [1]. Si d'abord on sait d'avance qu'il n'entre pas d'autre substance douée de pouvoir rotatoire que le sucre de cannes, dans le corps à analyser, on le dissout dans l'eau en proportion connue, et l'on cherche l'angle de déviation produit dans l'appareil de Biot. Les formules (2494) donnent alors la proportion de sucre contenu dans un poids p de la substance employée, ρ étant supposé connu.

Quand le sucre de cannes est mélangé avec d'autres espèces de sucre, pour le doser, on s'appuie sur la propriété qu'il possède de se transformer par l'action des acides en sucre de raisin qui tourne à gauche, transformation qui n'a pas lieu pour les autres substances qui se trouvent dans les sucs végétaux, et pour les sucres bruts et les mélasses. Voici comment on procède : après avoir clarifié et décoloré la dissolution au moyen du sous-acétate de plomb, qui coagule et précipite la substance colorante sans rien changer au pouvoir rotatoire, on observe l'angle de déviation dans l'appareil de Biot, ou dans celui de Soleil (2501). On procède ensuite à la transformation du sucre de cannes en sucre interverti. Pour cela, on mêle la dissolution avec 0,01 en volume d'acide chlorhydrique fumant, on chauffe au bain-marie, à 68°, pendant 10 minutes, on refroidit en plongeant le vase dans l'eau, et l'on mesure de nouveau la déviation, en mettant la liqueur dans un tube plus long de 0,01, pour tenir compte du volume de l'acide ajouté. La différence entre cette déviation et la précédente, représente la somme des déviations individuelles du sucre de cannes et du sucre interverti qui l'a remplacé. En effet, si le premier était seulement anéanti, on aurait une certaine différence, et cette différence s'accroît de l'effet du sucre interverti par lequel on remplace le sucre de cannes.

M. Mitscherlich ayant reconnu que la chaleur modifie sensiblement le pouvoir rotatoire du sucre lévogyre, M. Clerget a construit une table qui permet de calculer le titre exact du sucre de cannes, d'après l'expérience, quand la température est connue. Pour déterminer cette température, on se sert d'un tube muni d'une tubulure latérale à laquelle on ajuste un thermo-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVI, p. 175.

mètre, dont on relève le réservoir pendant les observations, pour ne pas arrêter la lumière. — Les expériences de M. Clerget ont été faites d'abord avec l'appareil de Biot, puis avec le suivant.

2501. Saccharimètre de Soleil. — La *figure* 1760 représente cet appareil. En *npa*L sont les coupes de toutes les pièces qu'il contient. Le tube T, rempli de la dissolution sucrée, est disposé entre deux diaphragmes percés ; l'un, D, fixe, et l'autre, D′, pouvant s'écarter du premier, vers lequel il revient en obéissant à un ressort à boudin dont on voit la coupe en *p*, de manière à maintenir le tube et à faciliter son installation. La lumière incidente est polarisée par un prisme achromatisé *c*, dont une des images est interceptée par un diaphragme. En *p* est un *bi-quartz à rotations inverses* (2481), dont la ligne de jonction est verticale ; il est représenté de face en *gd* ; la moitié *d* est dextrogyre, et la moitié *g*, lévogyre. La lumière, après avoir traversé le bi-quartz *p*, puis le tube T, arrive à une plaque de quartz *q* normale à l'axe, traverse ensuite un *compensateur r*, est analysée par le prisme bi-réfringent *a*, et enfin est reçue dans une petite lunette de Galilée L, L.

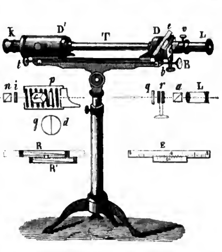


Fig. 1760. — 1/10.

RR′ est la coupe horizontale du compensateur ; composé de deux prismes de quartz perpendiculaires à l'axe, et de rotation contraire à la lame *q*. Ces prismes peuvent glisser l'un au devant de l'autre dans le sens horizontal et en sens contraire, de manière que l'épaisseur traversée par la lumière soit modifiée. Le mouvement leur est imprimé par un pignon denté fixé au bouton *b*, et qui agit sur deux crémaillères adaptées à la partie inférieure des montures des prismes. Une des montures porte une échelle d'ivoire *e*, représentée à part en E ; et l'autre, un vernier qui glisse en sens contraire de l'échelle, et sert à mesurer les déplacements opposés des deux prismes. Quand les zéros de la règle et du vernier coïncident, les deux prismes sont en face l'un de l'autre, et la somme de leurs épaisseurs est égale à l'épaisseur de la plaque *q*, dont l'effet rotatoire se trouve ainsi annulé. On peut alors, au moyen de la vis sans fin *v*, donner à l'analyseur *a* une position telle que les deux moitiés de la plaque à deux rotations *p* présentent la teinte sensible. Si alors on installe le tube T, les deux moitiés *g* et *d* sont de couleurs très différentes ; et pour les ramener à l'égalité, il faut, au moyen d'un compensateur *r*, com-

biné avec la plaque *q*, produire une rotation inverse de celle du liquide, soit en augmentant l'épaisseur du double prisme *r*, soit en la diminuant pour laisser dominer l'effet de la plaque *q*. Le sens dans lequel il faut faire marcher le vernier sur la régle, qui porte deux divisions opposées à partir de zéro, indique le sens de la rotation du liquide, et le déplacement du vernier donne l'angle de déviation, quand on sait à quelle épaisseur de quartz correspond une division de la règle. Ordinairement ces divisions correspondent à des dixiémes de millimètre; le vernier en donne encore les dixiémes, de sorte qu'on évalue les centiémes de millimétre. La moitié de cette quantité suffit pour produire une différence de nuance appréciable, dans les deux moitiés du bi-quartz.

Producteur des teintes sensibles. — Quand la lumiére ou le liquide, que l'on emploie, sont colorés, leur couleur s'ajoutant à celle qu'engendre la polarisation, modifie la teinte sensible et nuit à l'observation. Pour neutraliser cette couleur, M. Soleil ajoute à l'extrémité *k*, dans une douille qu'on fait tourner sur elle-même au moyen d'une roue dentée, d'un pignon, *t*, et du bouton B, un prisme bi-réfringent *n* et une lame de quartz *i*. Cette lame se trouve entre deux prismes *n* et *c*, dont le second fait l'office d'analyseur, et donne une couleur qu'on fait varier en faisant tourner le prisme *n*; et l'on trouve toujours une position de ce prisme donnant une teinte qui neutralise sensiblement celle du liquide ou celle de la lumiére employée.

Le saccharimètre exigeant l'observation de la teinte sensible, les résultats ne sont exacts qu'autant que les liquides employés dispersent la lumiére polarisée, suivant la même loi. Or, Biot a reconnu qu'il en est ainsi pour les dissolutions sucrées, auxquelles l'appareil est spécialement destiné. Mais on ne peut compter sur de bons résultats avec des dissolutions qui s'écartent notablement de la 4ᵉ loi (2478), comme celles qui vont nous occuper.

2502. Dispersions particulières à l'acide tartrique, etc. — La solution d'acide tartrique, dont nous avons déjà vu l'accroissement exceptionnel du pouvoir rotatoire avec la quantité de dissolvant (2498), présente aussi, relativement à la séparation des couleurs, des propriétés particuliéres; elle ne suit pas la 4ᵉ loi, et même la déviation du plan de polarisation n'augmente pas toujours avec la réfrangibilité des rayons. Ainsi, les rayons verts sont plus déviés que les rayons violets. Les lois suivant lesquelles il sépare les plans de polarisation des couleurs sont donc bien différentes de celles que suivent les autres liquides, et même elles varient avec la nature et la quantité de dissolvant, et avec la température. Biot a fait sur ce sujet de nombreuses expériences, qui ont été reprises récemment par M. Arndtsen [1], en rapportant les couleurs aux principales raies du spectre, au moyen de la méthode de M. Broch (2480). Sur la *figure* 1761, les variations du pouvoir rotatoire de l'acide tartrique dissous dans l'eau, pour les couleurs qui correspondent aux

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3ᵉ série, t. LIV, p. 403.

raies C, D, E, F, *e*, sont représentés par les ordonnées, et les proportions d'eau, allant de 0,5 à 0,95, par les abcisses. On voit combien le mode de dispersion change avec la proportion d'eau. M. Arndtsen fait remarquer qu'on pourrait rendre compte de ces propriétés singulières, en regardant l'acide tartrique comme un mélange de deux substances, l'une lévogyre, l'autre dextrogyre, dont les rotations augmenteraient avec les réfrangibilités des rayons, suivant des vitesses différentes. Les résultats dépendraient évidemment des proportions de ces deux substances dans le mélange. Or, Biot a trouvé qu'il existe des substances qui dispersent autrement que le quartz, le sucre, etc., par exemple, le camphre; et M. Arndtsen a reconnu que, dissous dans l'alcool, il écarte les plans de polarisation des rayons simples suivant la même loi générale que les autres corps, mais que l'écart augmente bien plus rapidement avec la réfrangibilité des rayons.

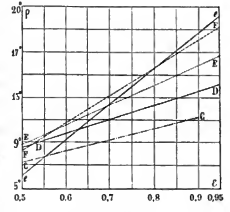


Fig. 1761.

2503. Relation entre le pouvoir rotatoire et l'hémiédrie cristalline. — Le cristal de roche produit la rotation du plan de polarisation, tantôt à droite, tantôt à gauche (2477), et M. Herschel a reconnu qu'il y a une relation entre le sens de la rotation et les phénomènes d'*hémiédrie* que peut présenter ce cristal (I, 411). M. Pasteur a remarqué que l'hémiédrie peut être *superposable*, c'est-à-dire que deux cristaux de mêmes dimensions présentant l'hémiédrie peuvent être tournés de manière à pouvoir coïncider, par la pensée, comme cela a lieu dans la boracite, le spath d'Islande, l'azotate de soude; mais il peut arriver aussi que les modifications dans deux cristaux de même substance soient telles que l'un soit symétrique de l'autre, en soit comme l'image dans un miroir; alors ces deux cristaux ne peuvent coïncider, et l'on a l'hémiédrie *non superposable*. Or, le cristal de roche présente, dans la variété plagièdre, des facettes qui tronquent les angles tétraédriques formés par les faces latérales du prisme et de la pyramide terminale, ou qui tronquent simplement les arêtes du prisme, et ces facettes sont inclinées inégalement sur les deux faces latérales contiguës; tantôt elles penchent vers la droite de l'observateur qui tient le cristal horizontalement, la pyramide terminale tournée de son côté; c'est-à-dire qu'elles entament la face de droite plus que celle de gauche; tantôt elles penchent vers la gauche. M. Herschel a reconnu que, dans le premier cas, le cristal tourne à droite, et dans le second, à gauche;

d'où il conclut que la cause qui détermine le sens de la rotation, est la même que celle qui détermine le sens de l'inclinaison des faces plagiédrales. La théorie de M. Delafosse (I, 413) rend facilement compte de ces résultats ; car les molécules dont la réunion constitue la molécule physique, peuvent être disposées de manière à former un certain polyèdre, ou le solide symétrique, par exemple un tétraèdre non régulier, ou son symétrique ; et alors deux cristaux formés par ces molécules physiques présenteront l'hémiédrie non superposable. On conçoit que les dispositions obliques en sens contraire, des sommets des deux sortes de molécules physiques, déterminent une action de même intensité sur la lumière, mais de sens contraire.

2504. Expériences de M. Pasteur sur les acides tartriques. — La relation importante entre l'hémiédrie du cristal de roche et le sens de sa rotation, était un fait isolé, lorsque M. Pasteur, dans de remarquables recherches sur les dissolutions d'acide tartrique et d'autres composés actifs, a découvert une relation entre le pouvoir rotatoire moléculaire des dissolutions actives et l'hémiédrie cristalline de la substance dissoute [1].

Il commence par établir, en s'appuyant sur les travaux cristallographiques de M. de la Provostaye, que tous les tartrates dérivent d'un prisme droit ou à peine oblique, à base rectangle, dont deux dimensions sont sensiblement égales, la troisième variant seule avec la base chimique. Il établit ensuite que les tartrates, qui sont tous dextrogyres, sont hémiédres à droite. Il remarque en même temps que, chez les tartrates doubles isomorphes de soude et de potasse, de soude et d'ammoniaque, l'hémiédrie aurait très bien pu avoir lieu en sens inverse relativement aux faces principales du cristal, et que cependant cette inversion ne se présente jamais.

En 1819, un fabricant de Thann, M. Karstner, avait obtenu, en traitant les tartres déposés par le vin des Vosges, un acide particulier, analogue à l'acide tartrique avec lequel il est isomère, et qui est connu sous le nom d'*acide racémique* ou *paratartrique*. Cet acide, qui s'était formé par hasard entre les mains de M. Karstner et n'avait pu être produit depuis, vient d'être obtenu par MM. Perkin et Duppa par une transformation de l'acide succinique.

Biot a reconnu que l'acide paratartrique et les paratartrates sont complétement inactifs ; et, en 1844, Mitscherlich annonça que le paratartrate de soude et d'ammoniaque est aussi dans ce cas, quoiqu'il y ait avec le tartrate des mêmes bases, identité complète de forme cristalline, de poids spécifique, de double réfraction, d'anglo des axes. M. Pasteur a trouvé la cause de cette neutralité, dans l'association de deux acides tartriques, l'un dextrogyre, l'autre lévogyre, qui, réunis, forment l'acide paratartrique. En effet, ayant fait cristalliser le paratartrate double de soude et d'ammoniaque, il vit quo certains cristaux présentaient l'hémiédrie à droite, et d'autres à gauche. Il tria avec soin ces deux sortes de cristaux, fit dissoudre à part ceux qui présentaient

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIV, p. 442 ; et XXVIII, p. 56.

l'hémiédrie dans le même sens, et reconnut que la dissolution déviait le plan de polarisation toujours d'une même quantité, et dans le sens indiqué par cette hémiédrie. Du reste, les deux sortes de cristaux sont identiques sous tous les rapports ; sauf en ce qui concerne l'hémiédrie, l'un étant comme l'image de l'autre dans un miroir. Dissous ensemble et en même quantité, ils donnent un liquide *inactif*.

Ayant alors chassé la base, en la remplaçant d'abord par la baryte, puis traitant par l'acide sulfurique, M. Pasteur obtint un acide dextrogyre avec les cristaux hémiédriques à droite, et un acide lévogyre avec ceux qui étaient hémiédriques à gauche. Le premier est identique sous tous les rapports avec l'acide tartrique ordinaire ou *acide dextrotartrique* ; l'autre, désigné sous le nom d'*acide tartrique gauche* ou *lévotartrique*, ne diffère du premier que par la constitution de sa molécule physique, qui présente la forme symétrique et non superposable à celle du premier. Ces deux acides ont même composition, même densité, même solubilité, même pouvoir rotatoire, sauf le sens, et dispersent de la même manière les plans de polarisation (2502). Tous les deux sont pyro-électriques au même degré ; mais les électricités qui se montrent aux extrémités homologues sont de signe contraire.

M. Pasteur, ayant mélangé des dissolutions des deux acides, a obtenu l'acide paratartrique *inactif*, et il a reconnu qu'il se forme une véritable combinaison chimique ; car il y a dégagement sensible de chaleur. Tous les essais faits pour transformer l'acide droit en acide gauche, et *vice versâ*, ont été infructueux ; de sorte qu'on n'a pu, jusqu'à ce jour, obtenir l'acide lévotartrique, qu'en le tirant de l'acide paratartrique.

M. Pasteur a passé en revue les sels des acides *dextrotartrique* et *lévotartrique* ; il a reconnu que deux sels de même composition présentent la même rotation et les mêmes caractères d'hémiédrie, mais en sens inverses.

2505. Ces résultats remarquables conduisent à poser ces deux questions : 1° Toutes les substances dont les solutions dévient le plan de polarisation présentent-elles, quand elles peuvent cristalliser, l'hémiédrie non superposable ? 2° L'hémiédrie non superposable accuse-t-elle toujours l'existence de la propriété rotatoire, tandis que l'hémiédrie superposable en indiquerait l'absence ? M. Pasteur a fait un grand nombre de recherches sur ce sujet important. Voici quelques-uns des faits nouveaux qu'il a découverts.

L'*asparagine* présente l'hémiédrie non superposable à gauche, et sa dissolution aqueuse dévie faiblement le plan de polarisation dans le même sens. Il en est de même quand elle est dissoute dans les alcalis, tandis qu'elle dévie à droite avec les acides. Cependant les alcalis et les acides agissent sur cette substance d'une manière tout à fait semblable, en donnant naissance à l'*acide aspartique*, qui possède aussi la propriété rotatoire à gauche avec les alcalis, et à droite avec les acides.

L'*acide malique* présente, avec l'acide tartrique, de nombreuses analogies ; la dissolution aqueuse est lévogyre, et la déviation augmente avec la température

et avec la proportion d'eau ; l'acide borique agit aussi comme sur l'acide tartrique (2498). Le *bimalate d'ammoniaque* tourne à droite, ainsi que le *malate neutre de chaux*, tandis que le bimalate de chaux est lévogyre. Tous les trois présentent l'hémiédrie non superposable. Le *malate neutre de zinc*, et le *malate double d'ammoniaque et d'antimoine*, dévient à droite.

Les dissolutions d'*acide fumarique* et de ses sels ne dévient pas le plan de polarisation ; et leurs cristaux ne présentent rien qui annonce l'hémiédrie.

Le *formiate de strontiane* et le *sulfate de magnésie* présentent l'hémiédrie non superposable ; cependant leurs dissolutions n'ont donné aucun signe de rotation. Mais M. Pasteur fait remarquer qu'il suffirait de changer certains angles des cristaux, de quelques minutes, pour que l'hémiédrie devînt superposable. Il semble donc que, si la propriété rotatoire existe, elle doit être trop faible pour être observable.

On peut conclure des faits qui précèdent, que l'hémiédrie non superposable indique l'existence du pouvoir rotatoire, et en fait connaître le sens quand les dissolutions sont formées avec des liquides chimiquement neutres. On peut admettre aussi que les substances dont les solutions possèdent la propriété rotatoire, sont susceptibles de présenter l'hémiédrie dissymétrique, quoiqu'il puisse arriver qu'on ne l'ait pas observée ; c'est ainsi que M. Pasteur n'avait pu d'abord la produire en faisant cristalliser les bimalates de chaux et d'ammoniaque. C'est après avoir observé l'hémiédrie non superposable, sur certains cristaux du système régulier, que M. Marbach a été conduit à découvrir la propriété rotatoire dans ces sortes de cristaux (2484).

2506. Acides aspartique et malique inactifs. — Nous avons vu l'inutilité des efforts faits pour transformer l'acide tartrique droit en acide gauche (2504). La chimie manifeste la même impuissance quand il s'agit de communiquer à la molécule physique d'une substance, la constitution qui lui donnerait la propriété rotatoire. En un mot, toutes les substances dont les dissolutions sont capables de dévier le plan de polarisation, possèdent naturellement cette propriété, ou la doivent à une autre substance entrant dans leur composition et la possédant aussi naturellement. M. Pasteur a donné une nouvelle confirmation à ce principe, en montrant que les acides *aspartique* et *malique* tirés de l'acide *fumarique*, qui est inactif, ne possèdent pas la propriété rotatoire des mêmes acides tirés directement des végétaux [1]. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

M. Dessaignes, en 1850, ayant fait agir l'acide chlorhydrique sur le *fumarate d'ammoniaque*, en tira de l'*acide aspartique*. Mais cet acide est complétement inactif, comme la substance qui lui a donné naissance. M. Piria, en traitant l'acide aspartique par l'acide azotique azoteux, l'a transformé en acide malique. Or, suivant que l'acide aspartique employé est actif ou inactif, l'acide malique obtenu présente la propriété rotatoire, ou en

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 30.

est complétement dépourvu. Il y a donc deux espèces d'acide aspartique, et deux espèces d'acide malique. L'une des espèces est active, et s'extrait directement de certains végétaux; l'autre est inactive, et dérive de l'acide fumarique, qui est inactif. Les sels de deux acides de même nom, ont même composition et présentent les mêmes propriétés chimiques, mais ils ont des cristallisations différentes, et ceux qui contiennent l'acide actif possédent seuls le pouvoir rotatoire.

On serait porté à croire que l'acide inactif est le produit de deux acides actifs de sens inverse, comme l'acide paratartrique; M. Pasteur combat cette opinion, en faisant remarquer que cet acide provient de l'acide fumarique, dont il faudrait supposer que les molécules sont partagées par la chaleur en deux groupes binaires *symétriques*, ou bien admettre une constitution binaire dans l'acide fumarique; hypothéses inadmissibles.

§ 2. — POLARISATION ROTATOIRE MAGNÉTIQUE.

2507. Dans la séance du 27 novembre 1845, M. Faraday annonça à la Société royale de Londres ce fait capital, qu'une masse homogéne transparente solide ou liquide acquiert, sous l'influence d'un fort aimant, ou mieux d'un électro-aimant, la propriété de faire tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée qui la traverse dans la direction de la ligne des pôles de l'aimant. Il reconnut aussi que le sens de la déviation change avec la direction du courant dans l'hélice magnétisante de l'électro-aimant. M. Faraday fut d'abord tenté d'attribuer ces phénoménes à une action directe du magnétisme sur la lumière, mais on les considère aujourd'hui, avec raison, comme produits par une modification qu'apporte le magnétisme intense dans l'arrangement des molécules pondérables. Cette découverte capitale de M. Faraday a été le point de départ de ses recherches sur le magnétisme universel et sur le diamagnétisme (III,1791); elle fut connue en France par une lettre adressée à M. Dumas. Aussitôt plusieurs physiciens, parmi lesquels MM. Pouillet, E. Becquerel, Wiedmann, Matthiessen, etc., s'empressérent de répéter les expériences.

2508. Modes d'observation. — Dans les expériences de M. Pouillet, un parallélipipède rectangle en verre, ayant ses bases bien paralléles et bien polies, était appuyé, comme un *contact*, sur les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval. Les deux extrémités d'un saccharimétre de Soleil, séparées et installées sur un banc de diffraction (2223) de chaque côté de la pièce de verre, servaient, l'une à polariser, l'autre à analyser le rayon qui la traversait.

M. E. Becquerel pose sur les pôles de l'électro-aimant vertical, deux pièces en fer doux, entre lesquelles il place les corps transparents. Ces pièces de fer sont forées parallèlement au plan des branches de l'électro; et portent, l'une

le polarisateur, l'autre l'analyseur. De cette manière, le rayon passe suivant la ligne même des pôles, et les déviations du plan de polarisation sont beaucoup plus grandes : un flint de 48^{mm} d'épaisseur a donné une déviation de 25°,6 avec les armatures, et de 6°,30 seulement sans les armatures.

L'appareil que M. Ruhmkorff a imaginé pour ces expériences, donne des effets encore plus marqués. Dans cet appareil (*fig.* 1762), dont nous avons indiqué d'autres usages (III,1786); les cylindres de fer doux enveloppés par les bobines, sont forés suivant leur axe. En *m* est un prisme de Nicol, destiné à polariser la lumière; en *o*, le prisme analyseur muni de son limbe R. La pièce transparente se place en *ab*, après qu'on a dévissé les bonnettes *a* et *b*, avec lesquelles on ferme les tubes de fer, pour d'autres expériences. Nous

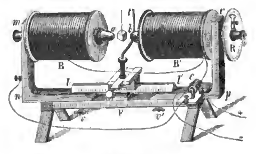


Fig. 1762.

rappellerons que les pôles peuvent s'écarter, et être fixés à différentes distances, au moyen des vis *v*, *v'*, et qu'il y a en *c*, un commutateur au moyen duquel on peut changer le sens du courant.

On peut enfin opérer avec de simples hélices, dans l'intérieur desquelles on place le parallélipipède transparent, et l'on trouve qu'il est indifférent que ce corps soit sur l'axe ou à côte de l'axe de l'hélice, pourvu qu'il reste en dedans; car en dehors l'action est nulle.

Voici maintenant comment on procède : la section principale de l'analyseur étant placée de manière à donner l'obscurité avec la lumière simple, ou la teinte sensible avec la lumière blanche, suivant la disposition du polarisateur, on fait passer le courant dans l'électro-aimant; aussitôt la lumière reparaît, ou la teinte change. En tournant l'analyseur, on cherche à rétablir l'état lumineux primitif, et l'on trouve ainsi de combien de degrés a tourné le plan de polarisation, et dans quel sens il a tourné. — M. Bertin projette le faisceau émergent, sur un écran, en enlevant les diaphragmes qui limitent la grosseur du faisceau, polarisant la lumière solaire avec une pile de glaces, et employant pour analyseur un gros prisme bi-réfringent, dont les deux images s'éteignent alternativement quand on le fait tourner. En mettant immédiatement après la

pile de glaces, la plaque à deux rotations de Soleil, on observe les changements de teinte des deux moitiés.

On a reconnu par ces diverses méthodes, que le plan de polarisation tourne d'une quantité angulaire, qui dépend de la nature de la substance, de son épaisseur, de l'intensité du courant, de la distance des pôles magnétiques, et enfin de la direction des rayons lumineux par rapport à la ligne des pôles ; l'action étant maximum quand les rayons sont parallèles à cette ligne, et nulle quand ils lui sont perpendiculaires.

2509. Sens de la rotation. — M. Faraday a reconnu que le sens de la rotation ne dépend pas des substances, et qu'il est le même que le sens du courant dans l'hélice magnétisante de l'électro-aimant. Cette loi ne s'applique pas aux substances qui contiennent certains métaux magnétiques. Elle montre que si l'on renverse le courant, la déviation change de sens. Quand le corps transparent est appuyé sur les pôles de l'électro-aimant, on détermine le sens au moyen de celui qu'auraient les courants d'Ampère (III,1711) dans une pièce de fer doux qui serait mise à la place de ce corps. Si ce dernier est simplement placé dans une hélice, la rotation se fait encore dans le sens du courant.

r s

Fig. 1763.

Il résulte de là que : 1° Si le parallélipipède de verre appliqué sur les pôles de l'aimant dépasse ces pôles, les portions qui dépassent feront tourner le plan de polarisation en sens contraire de la portion placée entre les pôles ; car, une pièce de fer doux mise à la place du corps transparent, posséderait deux points conséquents avec deux pôles contraires aux extrémités. Il pourra donc arriver que l'effet soit nul, comme l'a vérifié M. Pouillet. 2° Si, le courant restant le même, on faisait passer le rayon lumineux en sens contraire, ce qui obligerait l'observateur à aller se placer du côté opposé de l'appareil, il verrait la déviation se faire en sens contraire ; ce qui est tout différent de ce qui a lieu avec les substances douées du pouvoir rotatoire moléculaire (2477). M. Faraday a profité de cette circonstance pour amplifier l'effet produit : la pièce de verre (*fig.* 1763) étant argentée à ses deux extrémités, excepté sur une étendue de 3^{mm}, on fait réfléchir le rayon plusieurs fois intérieurement ; s'il se réfléchit quatre fois, la rotation est la même que s'il avait traversé une masse de verre cinq fois plus longue. Dans une expérience de M. Faraday, la rotation était de 12° quand le rayon ne faisait que traverser, et elle était de 36° et de 60°, quand il subissait deux réflexions ou quatre réflexions intérieures. On peut, en employant cet artifice, opérer sur des masses de verre peu épaisses, permettant de rapprocher beaucoup les pôles magnétiques, et employer alors un fort aimant ordinaire. Le quartz, ou un liquide possédant la polarisation rotatoire moléculaire, ne donneraient pas, après plusieurs réflexions, plus d'effet que si le rayon n'avait traversé qu'une fois ; et même la rotation serait nulle s'il avait traversé un nombre pair de fois, deux fois par exemple, comme

cela a lieu quand on place une plaque de quartz sur le miroir inférieur de l'appareil de Norremberg.

Si, au contraire, on place, comme l'a fait M. Bertin, une lame de verre sur ce miroir, après avoir appliqué en dessous le pôle de l'électro-aimant, on observe facilement la rotation du plan de polarisation ; surtout si l'on place sous l'analyseur, la plaque à deux rotations de Soleil (2481).

2510. Cas des substances magnétiques. — Les substances diamagnétiques tournent toutes le plan de polarisation dans le sens du courant. Mais il n'en est plus de même de toutes les substances magnétiques, comme il résulte des expériences de M. Verdet sur un grand nombre de liquides [1]. M. Verdet commence par établir, en opérant sur des solutions étendues à divers degrés, que, dans une solution aqueuse d'un sel, les molécules salines et celles du liquide agissent sur la lumière polarisée indépendamment les unes des autres, chacune d'elles apportant son *pouvoir rotatoire magnétique* spécial, de manière que la rotation produite est la somme des rotations individuelles dues aux molécules des deux substances. Cela posé, il trouve que certains sels dissous dans l'eau diminuent la déviation qu'elle produit seule. La déviation peut même avoir lieu en sens contraire ; par exemple, pour la dissolution concentrée de perchlorure de fer, qui donne une déviation égale à peu près à celle du verre pesant de M. Faraday, et égale par conséquent à 6 à 7 fois celle que l'eau pure produit en sens contraire. Nous avons donc une solution qui fait tourner le plan de polarisation *en sens inverse du sens du courant*. En employant un dissolvant agissant moins fortement que l'eau, comme l'alcool, l'éther, et surtout l'esprit de bois dont l'action rotatoire magnétique est à peine sensible, on arrive plus facilement à obtenir de ces effets inverses. Par exemple, une partie de perchlorure de fer dans 4 d'éther, a donné un liquide qui tournait en sens inverse du courant ; et avec deux fois plus d'éther, la solution s'est trouvée inactive. Une dissolution de 11 parties de perchlorure de fer dans 9 d'esprit de bois, donne une rotation inverse considérable.

On voit donc que certains liquides, sous l'influence du magnétisme, font tourner le plan de polarisation en sens inverse du courant ; ils possèdent, suivant l'expression de M. Verdet, un pouvoir rotatoire magnétique *négatif*. Il était important de constater cette propriété dans des substances non dissoutes. Tous les essais tentés jusqu'à présent sur des corps solides ont été infructueux ; mais M. Verdet a trouvé une substance, le *bichlorure de titane*, qui est liquide à la température ordinaire, et qui donne une rotation magnétique négative sans intervention d'aucun dissolvant.

M. Verdet a conclu de ses nombreuses expériences, que toutes les substances diamagnétiques dans lesquelles il n'entre aucun métal magnétique, présentent un pouvoir rotatoire magnétique *positif*. On ne peut en dire autant de celles

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LII, p. 129.

qui contiennent un métal magnétique, et l'on peut, à cet égard, diviser les métaux en trois classes, ayant pour types le *fer*, le *nickel* et le *manganèse*. Les métaux de la première classe (fer, titane, cérium, lanthane...,), communiquent aux substances qui les contiennent, le pouvoir rotatoire *négatif*. Ceux de la seconde (nickel, cobalt, molybdéne...) communiquent le pouvoir *positif*. Le manganése forme un type intermédiaire, dont les composés ont un pouvoir tantôt positif, tantôt négatif.

2511. Dispersion des plans de polarisation des diverses couleurs. — M. Bertin a constaté, avec le flint, que cette dispersion se fait suivant les mêmes lois que pour le quartz : ayant compensé la rotation du flint au moyen du compensateur de Soleil (2501), il a trouvé que l'image restait blanche dans toutes les positions de l'analyseur, avec tous les flints qu'il a essayés. Cette loi, que M. E. Becquerel avait également constatée de son côté, a été vérifiée par M. Wiedemann sur l'essence de térébenthine.

2512. Variations du pouvoir rotatoire magnétique avec la substance. — Tous les corps liquides et tous les solides transparents non cristallisés qu'a essayés M. Faraday, lui ont montré, à divers degrés, le pouvoir rotatoire magnétique. M. Matthiessen n'en a trouvé aucun signe dans l'acide phosphorique fondu, le silex, l'agate et le fluorure de calcium. Les gaz n'en ont aussi donné aucun signe. Quand une substance possède naturellement la propriété rotatoire, le magnétisme agit comme si elle était inactive, et le pouvoir rotatoire qu'il produit s'ajoute à celui que posséde la substance, ou s'en retranche, suivant le sens du courant.

Les corps cristallisés semblent, en général, rebelles à l'action magnétique. Sur une centaine de cristaux, M. Matthiessen n'a trouvé que le sel gemme qui soit susceptible de prendre la propriété rotatoire ; mais aussi il la prend à un haut degré, car il dévie le plan de polarisation à peu prés autant que le verre pesant de Faraday. Les cristaux de chlorure de mercure, de carbonate et de chromate de plomb sont insensibles, et cependant les mêmes substances amorphes produisent des effets remarquables. M. E. Becquerel a produit la rotation magnétique, dans le cristal de roche rendu inactif par la réunion de deux plaques de sens opposé [1]. Il l'a aussi observée en employant la lame à deux rotations de Soleil, donnant la teinte de passage ; il a vu l'une des moitiés tourner au rouge, et l'autre au bleu, sous l'influence du magnétisme. M. Bertin, avec l'appareil de Norremberg disposé comme nous l'avons dit plus haut (2509), n'a besoin d'employer qu'une simple lame de quartz, dont la rotation moléculaire est annulée dans les deux trajets du rayon réfléchi sur la glace inférieure de l'appareil. M. E. Becquerel a encore obtenu des signes de rotation, avec le béril et la tourmaline, et il a reconnu qu'ils sont d'autant plus marqués que les substances sont moins pures.

On a fait beaucoup d'expériences pour comparer les pouvoirs rotatoires

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XVII, 437.

magnétiques des diverses substances, placées dans les mêmes conditions. On a longtemps regardé le verre pesant (boro-silicate de plomb) comme ayant le plus grand pouvoir; mais sur 200 espèces de verres artificiels qu'il a examinées, M. Matthiessen en a trouvé 23 plus énergiques; parmi lesquelles, le silicate de plomb pur lui a donné une déviation plus que double (20 au lieu de 9)[1]. M. Verdet a produit, avec la dissolution de 11 de perchlorure de fer dans 9 d'esprit de bois, une rotation négative presque double de celle du verre pesant, et triple de celle du sulfure de carbone.

D'après M. Matthiessen, les silicates, et peut-être les chlorures, ont le plus grand pouvoir rotatoire. L'oxyde de plomb est la base qui, introduite dans un verre, en augmente le plus le pouvoir rotatoire. Ensuite viennent le bismuth, l'antimoine, le zinc, le mercure, l'argent. La présence de la magnésie, de la strontiane, de la baryte, ne paraît pas avoir d'influence; celle de la chaux, de la potasse, de la soude, diminue l'effet.

Voici quelques résultats trouvés par M. Bertin; le pouvoir rotatoire magnétique du verre pesant étant représenté par 100 :

Verre pesant	100	Protochlorure de phosphore	51
Flint de Guinand	87	Dissolution de chlorure de zinc	55
Flint de M. Matthiessen	83	Dissolution de chlorure de calcium	45
Flint commun	53	Eau	25
Bichlorure d'étain	77	Alcool à 36°	18
Sulfure de carbone	74	Ether	15

On ne peut donner les déviations absolues, parce qu'elles dépendent de circonstances très variables; comme le poids de l'électro-aimant, la longueur et la grosseur du fil de l'hélice magnétisante, la force de la pile, la distance des pôles magnétiques. On a cherché inutilement quelques relations entre le pouvoir rotatoire magnétique et l'indice de réfraction ou les autres propriétés physiques des corps transparents. Cependant il semble résulter des expériences de Wertheim, que le pouvoir le plus grand appartient aux corps les moins bi-réfringents, soit naturellement, soit par compression.

2513. Relation entre l'action rotatoire et l'intensité magnétique. — M. Wiedemann et M. Bertin ont, les premiers, cherché les lois qui lient les intensités rotatoires à la force magnétisante et à la distance aux pôles magnétiques. Le premier plaçait la substance transparente dans une hélice; le second se servait d'un électro-aimant. Nous reviendrons sur les principaux résultats auxquels ils sont arrivés, après avoir exposé les recherches plus complètes de M. Verdet. Ce dernier physicien s'est proposé de trouver la relation entre l'action élémentaire exercée en un point du corps transparent, et l'action magnétique qui existe en ce point[2].

[1] *Bibliothèque universelle de Genève* (Arch. des sc.), t. V, p. 126.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XLI, p. 370.

Comme, à la petite distance à laquelle l'action s'exerce, elle ne peut être la même sur tous les points de la pièce transparente, M. Verdet commence par former, suivant la méthode de M. Faraday et de M. Plucker, un *champ magnétique* d'intensité uniforme, en vissant aux pôles des électro-aimants de l'appareil de Ruhmkorff (*fig.* 1762), deux disques percés, en fer doux, dont le diamètre égale celui des bobines, et entre lesquels un point magnétique devait être partout également influencé (excepté prés des bords) ; les différences de distance à ces disques étant compensées par les différences d'obliquité des actions exercées. Du reste, M. Verdet a vérifié cette constance dans les effets, au moyen d'une pièce de verre pesant ; tant qu'elle ne touchait pas une des armatures circulaires, ou ne s'approchait pas trop des bords, on pouvait la déplacer sans que la teinte sensible donnée par l'analyseur fût modifiée. On peut conclure de là que les propriétés optiques développées dans la masse de verre sont les mêmes (sauf la grandeur de la rotation) que celles qui sont développées dans un élément quelconque infiniment petit de cette masse.

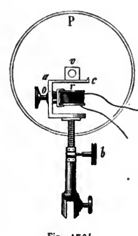


Fig. 1764

Cela posé, M. Verdet a cherché l'*action magnétique* exercée en un point donné occupé par un élément du verre, et à laquelle est dû le pouvoir rotatoire qu'il posséde. Pour cela, il s'est appuyé sur une conséquence qu'il déduit des lois de MM. Newman et W. Weber, relative aux courants induits dans un circuit fermé qu'on déplace en présence d'un pôle magnétique. Il prouve que, si dans un espace où l'action magnétique est constante en grandeur et en direction, on dispose un courant circulaire dont le plan est paralléle à la direction de l'action magnétique, et si on le fait tourner de 90° autour d'un axe perpendiculaire à cette direction, il se développe un courant induit proportionnel à la grandeur de l'action magnétique.

Pour appliquer ce principe, on place entre les deux plaques polaires de l'appareil de Ruhmkorff, une petite bobine circulaire *r* (*fig.* 1764), dont le diamètre est 0,2 environ de celui des plaques. Cette bobine est mobile autour d'un axe horizontal, *o*, parallèle aux plaques polaires P. Le support de cette bobine peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'un pignon denté *b* et d'une crémaillére dont est muni son support, que l'on fixe sur la régle *ll'* (*fig.* 1762). Le fil de la bobine présente la même résistance que celui d'un réomètre ou magnétomètre de M. Weber (III, 1613), avec lequel on le met en communication. La bobine circulaire étant d'abord horizontale, on la fait tourner rapidement de 90° autour de l'axe *o* ; un courant d'induction se développe et imprime au barreau aimanté du réomètre, une impulsion première dont l'angle

se mesure par la méthode de M. Gauss (I, 435). On démontre par l'analyse que cet angle est proportionnel à l'action magnétique qui a donné naissance au courant induit. La force magnétique une fois mesurée, on remplace la bobine, par la pièce transparente *v* posée sur une tablette en cuivre *ac*, que l'on fait descendre à la place de la bobine, et l'on observe la rotation du plan de polarisation, soit au moyen de la lumière blanche et de la teinte sensible, soit au moyen des rayons solaires ayant traversé une dissolution ammoniacale de sulfate de cuivre, qui leur donne une teinte voisine de la raie G du spectre. On mesurait une seconde fois la rotation en renversant le courant, puis on faisait une nouvelle évaluation de la force magnétique.

Les expériences ont porté sur le verre pesant de M. Faraday, sur le flint, et sur le sulfure de carbone. L'action magnétique était modifiée, soit en faisant varier le nombre des couples de la pile, de 4 à 20; soit en changeant la distance des armatures, de 50 à 90^{mm}. Le quotient de la force magnétique par la déviation a toujours été le même avec la même substance; d'où l'on conclut cette loi très simple : *la rotation du plan de polarisation est proportionnelle à l'action magnétique.* Cette loi a été vérifiée dans le cas de la rotation négative, au moyen de la dissolution du bichlorure de fer dans l'esprit de bois. La déviation était mesurée à 5′ ou 6′ près, et l'erreur probable de l'évaluation de l'action magnétique était d'une division de l'échelle du magnétomètre. Ces incertitudes, quoique très petites, suffisent pour rendre compte des différences que présentent les résultats.

La loi qui précède étant la même pour tous les éléments des corps transparents, et l'action magnétique variant en raison inverse du carré de la distance, on peut dire que *le pouvoir rotatoire développé par un centre magnétique, dans une tranche infiniment mince du corps transparent, varie proportionnellement à l'action magnétique, et en raison inverse du carré de la distance.* Il résulte de là que, pour un même état de l'appareil, la déviation doit être proportionnelle à l'épaisseur traversée par la lumière.

M. Wiedemann avait trouvé antérieurement [1], par le procédé de M. Broch (2480), que la rotation produite par un liquide naturellement inactif, introduit dans une bobine parcourue par un courant, est proportionnelle à l'intensité du courant. Cette loi est d'accord avec celle qui précède; car les actions magnétiques exercées sur un point magnétique placé dans la bobine, seraient soumises à la même loi. Comme la rotation était trop faible pour être mesurée avec précision, M. Widemann plaçait entre la bobine et le polarisateur un tube d'essence, et il retranchait de la rotation observée, celle que produisait l'essence seule.

M. Bertin avait trouvé, en faisant agir une seule branche d'électro-aimant sur une pièce de verre qu'il en éloignait peu à peu, que les distances variant en progression arithmétique, la rotation diminuait en progression géométri-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXXIV, p. 121.

que [1] ; ce qui semble en désaccord avec la loi de M. Verdet. Mais, comme le fait remarquer ce dernier, la base du fer doux représente une surface magnétique qui ne peut être assimilée à un point. Du reste, il résulte d'expériences faites avec l'appareil même qui avait servi à M. Bertin, que l'*action magnétique* varie, à différentes distances de la surface terminale de l'électro-aimant, à peu près suivant la loi qu'il avait trouvée pour les angles de déviation ; il n'y a donc pas désaccord entre les deux lois ; seulement celle de M. Bertin n'est vraie que dans des conditions où il expérimentait, tandis que l'énoncé de M. Verdet exprime la loi élémentaire du phénomène.

2514. Variation de la déviation avec l'obliquité de l'action magnétique par rapport aux rayons. — M. Faraday avait reconnu la diminution de l'action magnétique quand elle s'exerce obliquement à la direction des rayons lumineux. M. Verdet s'est proposé de trouver la loi de cette diminution. Il lui a fallu, pour cela, faire passer le rayon un peu au-dessus des armatures de l'électro-aimant, et cependant placer le corps transparent dans un champ magnétique uniforme. La *figure* 1765 représente la partie supérieure horizontale de l'appareil au moyen duquel ces conditions ont été remplies. AA, A'A' sont les extrémités des branches d'un électro-aimant vertical mobile autour d'un axe placé à égale distance de ces branches, et porté par un pied à vis calantes V, V, V, V. Un vernier *v* tourne avec le système, et mesure l'angle de rotation sur le cercle fixe CC. Chaque branche de l'électro-aimant soutient une armature en fer doux, composée d'un prisme *p*, *p'* pouvant glisser dans des rainures *rr*, *r'r'*, et portant des lames de fer doux L, L'. Des expériences faites par la méthode que nous avons exposée (2512), ont prouvé que les actions optiques et magnétiques ne varient pas sensiblement, entre les plaques et un peu au-dessus de leur bord supérieur.

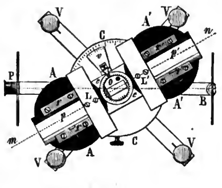


Fig. 1765.

Le corps transparent est soutenu un peu au-dessus de ces bords par un plateau circulaire *o* muni d'un vernier, et mobile au centre d'un second plateau gradué *cc*, porté par une colonne qui tourne sur elle-même avec l'électro-aimant et le repère *o*. Une barre PB, fixée au pied de l'instrument, porte en P un prisme polarisateur, et en B un écran percé d'un petit trou.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXIII, p. 5.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XLIII, p. 37.

L'analyseur est à part, au-delà de l'écran. Toutes les parties de l'appareil sont en cuivre, excepté l'électro-aimant et ses armatures.

Voici comment on opérait : le plan des branches de l'électro-aimant étant placées dans la direction du rayon lumineux, et les faces d'entrée et de sortie de la pièce transparente étant normales à ce rayon, on observait la déviation du plan de polarisation. On plaçait ensuite l'électro-aimant dans une direction oblique *mn* ; la pièce transparente, qui tournait avec lui, était ramenée à sa première position en faisant tourner le plateau *o* en sens opposé. On observait de nouveau la déviation du plan de polarisation, puis on répétait l'observation en faisant tourner l'électro-aimant en sens contraire, et l'on prenait la moyenne des deux résultats. La pièce transparente était ainsi toujours traversée de la même manière par la lumière ; il n'y avait de changé que la direction de l'action magnétique.

M. Verdet a reconnu ainsi, que *la rotation du plan de polarisation est proportionnelle au* cosinus *de l'angle compris entre la direction du rayon lumineux et celle de l'action magnétique*. En d'autres termes, *la rotation est proportionnelle à la composante magnétique parallèle à la direction du rayon.* Cette loi explique pourquoi il n'y a pas d'effet quand les rayons sont perpendiculaires à la direction de l'action magnétique.

2515. De la cause des actions rotatoires magnétiques. — La propriété rotatoire que prennent la plupart des corps sous l'influence des aimants, paraît due à l'action du magnétisme sur leurs molécules, actions qui consistent, soit à modifier l'arrangement des molécules élémentaires dans la molécule physique, soit à donner à celle-ci une orientation déterminée. La manière dont ces modifications s'accomplissent dépend évidemment du sens du courant. De semblables effets sur la disposition des molécules n'ont rien de surprenant, quand on se rappelle les déplacements moléculaires produits par les électro-aimants dans les corps magnétiques (III,1676), et l'action du magnétisme sur tous les corps (III,1791). Tout ce qui gêne les déplacements moléculaires devra donc nuire au développement de la propriété rotatoire ; aussi, voyons-nous les cristaux ne la manifester que rarement.

Il résulte aussi des expériences de MM. Matteucci, Edlund et Wertheim, que la compression amortit la sensibilité magnétique des substances transparentes, en gênant les mouvements moléculaires. M. Matteucci comprimait la plaque transparente, dans la petite presse de M. Brewster (*fig.* 1731), munie de pièces d'acier planes au lieu de pièces arrondies. Il se servait du bi-quartz à rotations inverses de M. Soleil ; l'analyseur donnant la teinte de passage, il comprimait le corps transparent, et les deux moitiés présentaient des nuances différentes; ce qui montre que la compression seule fait tourner le plan de polarisation. Il rétablissait l'égalité de teinte en tournant l'analyseur, et faisait passer le courant dans l'appareil de Ruhmkorff; les teintes changeaient, il

[1] *Ann. de ch. et de ph.*, 3e sér., t. XIV, p. 354 ; t. XXVIII, 493.

les ramenait encore à l'égalité, et mesurait ainsi la déviation du plan de polarisation produite par le magnétisme. Cette déviation était plus grande, quand le magnétisme agissait dans le même sens que la compression, que lorsqu'il agissait en sens opposé. La différence était à peu près du simple au double, dans presque tous les cas observés. Une compression un peu forte sur le crown, le rend tout-à-fait insensible à l'action du magnétisme. — Wertheim a expérimenté sur des pièces de verre soumises à l'action de la presse (*fig.* 1747), entre les deux pôles d'un appareil de Ruhmkorff. Il a vu la rotation diminuer par l'augmentation de pression ; mais il n'a pu déterminer exactement le moment où elle cesse de se montrer, la double réfraction qui se manifeste rendant visibles simultanément les deux images données par l'analyseur bi-réfringent. Cependant, en opérant avec les rayons homogènes, il a reconnu que la rotation disparaît, à peu près au moment où la différence de marche devient égale à $\frac{1}{2}\lambda$; car alors l'image ordinaire est complètement obscure.

Un autre fait vient prouver l'existence des modifications moléculaires. M. Faraday a constaté que le pouvoir rotatoire augmente graduellement pendant quelques secondes après qu'on a établi le courant de l'électro-aimant ; mais qu'il cesse subitement avec ce courant. M. Matthiessen a reconnu qu'on rend l'augmentation plus sensible, quand on interrompt plusieurs fois le courant ou qu'on en change brusquement le sens ; surtout quand le verre est légèrement trempé, et cette trempe se trouve modifiée. Par exemple, le verre pesant, légèrement trempé, éprouve une augmentation de pouvoir rotatoire après plusieurs secousses, et perd cet accroissement après le repos. Les verres contenant un métal magnétique ou du bismuth, perdent leur trempe pendant ces alternatives. En ramollissant des verres après la fonte, M. Matthiessen leur a fait perdre quelquefois jusqu'à un quart de leur sensibilité primitive. — La chaleur, qui écarte les molécules, les rend plus faciles à déplacer par le magnétisme ; car M. Matteucci a vu le pouvoir rotatoire augmenter avec la température. Par exemple, le verre pesant, qui donnait 6° de déviation, a donné 8° quand il était soumis à l'expérience immédiatement après avoir été retiré de l'huile bouillante.

CHAPITRE XIV.

SUPPLÉMENT A L'ÉTUDE DE LA CHALEUR RAYONNANTE. CONCLUSION.

2516. Dans ce chapitre, nous allons montrer que les rayons de chaleur interférents se polarisent et éprouvent la double réfraction, comme les rayons lumineux ; ce qui complétera l'étude de la chaleur raynnnante, et confirmera ce que que nous avons dit de l'identité de cause de ces deux sortes de rayons (II,745).

Interférence et diffraction des rayons calorifiques. — MM. Fizeau et L. Foucault ont montré l'interférence des rayons de chaleur, au moyen des miroirs de Fresnel (2222). La température des franges était observée à l'aide d'un petit thermomètre à alcool, dont la boule présentait nn peu plus de 1^{mm} de diamètre, et dont les degrés avaient cependant 8^{mm} de longueur. Ce thermomètre pouvait se déplacer dans l'intérieur d'une boîte fermée, dans laquelle la lumière que produisent les franges pénétrait par des ouvertures garnies de glaces. Le thermomètre était observé au moyen d'un microscope placé en dehors, et muni d'un micromètre focal, dont les divisions correspondaient à $\frac{1}{400}$ de degré. Le réservoir du thermomètre occupait le quart de la largeur d'une frange brillante. Dans une expérience, les températures, en divisions du micromètre, ont été 20, 9, 35, 9, 20 ; le nombre 35 correspondant à la frange centrale.

Le même instrument a permis de reconnaître des variations de température, dans le voisinage de la limite d'ombre géométrique d'un écran, dont le bord était parallèle à une fente par laquelle entraient les rayons solaires. La température augmentait, en allant de l'ombre vers sa limite géométrique , et atteignait un maximum au moment de sortir de la première frange brillante, et ce maximum était supérieur à la température de l'espace où les rayons parvenaient sans être influencés par l'écran [1].

M. Knoblauch, qui avait, dès 1846, annoncé la diffraction de la chaleur, a reconnu qu'un faisceau calorifique sortant d'une fente, divergeait en dehors de la limite géométrique, et d'autant plus que la source linéaire de lumière était

[1] *Comptes-rendus de l'Académie des sciences* de Paris, t. XXV, p. 447.

plus éloignée, et que la fente était plus étroite. La température était évaluée au moyen d'une pile thermo-électrique, dont la base était couverte par un écran présentant une fente parallèle aux franges. Le même physicien a observé des *franges calorifiques*, coïncidant avec les franges lumineuses des réseaux. — Ayant enfin projeté sur un écran, au moyen d'une lentille, les anneaux colorés formés entre deux verres (2290), il a pu reconnaître une différence de température au centre, quand il y avait une tache brillante, ou une tache noire.

2517. Polarisation de la chaleur. — Les rayons de chaleur sont susceptibles de se *polariser*, comme les rayons lumineux, et par les mêmes moyens. Bérard, en 1821, obtint, le premier, de la chaleur polarisée par la réflexion sur un miroir de verre ; une seconde réflexion servait à reconnaître l'état de polarisation, par les variations d'intensité des rayons réfléchis avec l'angle des deux plans de réflexion. Un petit miroir métallique concave recevait les rayons après leur seconde réflexion et les concentrait sur la boule d'un thermomètre très sensible. Ces expériences, faites sous les yeux de Berthollet et Dulong, puis confirmées par M. Erman, ne devaient laisser aucun doute ; cependant, des essais infructueux de Powel avec des miroirs, de Melloni et de Nobili, au moyen de tourmalines, avaient jeté l'indécision dans les esprits, lorsque M. Forbes, en 1834, obtint des signes évidents de polarisation dans des rayons calorifiques qui avaient traversé des tourmalines ou des piles de mica.

Peu de temps après, Melloni reprit la question au moyen de son thermo-multiplicateur[1] ; les rayons de la source, rendus parallèles au moyen d'un miroir concave, traversaient une large lentille de sel gemme et allaient former un foyer, près duquel on plaçait un système de deux tourmalines superposées. Une seconde lentille de sel gemme, beaucoup plus petite que la première, recevait les rayons divergents partant du foyer, et en formait un faisceau parallèle plus étroit, et, par conséquent, dans lequel la chaleur était plus intense. Ce faisceau tombait tout entier sur la base de la pile du thermo-multiplicateur. Cet instrument indiquait une température minimum, quand les tourmalines étaient croisées, et maximum, quand elles étaient parallèles. Les tourmalines étant un peu plus près de la seconde lentille que le foyer commun, les rayons qu'elles émettaient après s'être échauffées sortaient de la seconde lentille, en divergeant et diminuant assez d'intensité pour ne pas influencer sensiblement le thermoscope.

2518. Double réfraction de la chaleur, et polarisation par double réfraction. — M. Knoblauch a réalisé la double réfraction de la chaleur, en faisant passer un pinceau de rayons solaires à travers un spath d'Islande naturel. Il lui était facile de trouver la direction des rayons calorifiques, en

[1] *Bibl. de Genève*, t. IX, 62; et *Ann. de ch. et de ph.*, 3e série, t. LIX, 492.
[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. LXI, p. 375 ; t. LXV, p. 5.

observant la lumière qui les accompagnait. Il constata ainsi qu'en faisant tourner le spath, l'un des faisceaux était immobile et suivait, par conséquent, les lois ordinaires de la réfraction, tandis que l'autre tournait et représentait le faisceau *extraordinaire*. Il constata aussi que les deux faisceaux étaient de même intensité. — Ayant fait passer ces faisceaux successivement à travers un second spath, il reconnut, par l'extinction de l'un d'eux quand les sections principales des deux spaths étaient parallèles ou perpendiculaires, que les deux faisceaux étaient polarisés dans des plans rectangulaires. Une plaque de spath, taillée perpendiculairement à l'axe, ne donne aucun de ces résultats.

Pendant que se faisaient ces expériences, MM. de la Provostaye et P. Desains observaient, de leur côté, la double réfraction de la chaleur des rayons solaires par un prisme achromatique en spath d'Islande, et constataient, en faisant réfléchir successivement les pinceaux ordinaire et extraordinaire sur un miroir de verre, sous l'incidence de 56°, que l'intensité des rayons réfléchis était nulle quand le plan de réflexion était perpendiculaire au plan de polarisation des rayons incidents. Ils ont aussi reconnu l'égalité d'intensité des deux faisceaux reçus directement sur la pile du thermo-multiplicateur [1].

2519. Lois de la chaleur polarisée par double réfraction et par réflexion. — MM. de la Provostaye et P. Desains ont établi que les rayons calorifiques polarisés, possèdent des propriétés correspondantes à celle des rayons lumineux polarisés.

Loi de Malus. — Quand un pinceau de chaleur renvoyé par un héliostat, et polarisé par un prisme de spath d'Islande, passe à travers un second prisme bi-réfringent, les intensités des rayons émergents suivent la loi de Malus (3383), c'est-à-dire qu'elles sont proportionnelles à $\cos^2 \alpha$ pour le rayon ordinaire, et à $\sin^2 \alpha$ pour le rayon extraordinaire, α étant l'angle des sections principales des deux prismes.

Formules de Fresnel. — Les rayons polarisés étant reçus sur un miroir de verre, de manière que le plan d'incidence coïncide avec le plan de polarisation ou lui soit perpendiculaire, les intensités des rayons réfléchis, mesurées avec le thermo-multiplicateur, se sont trouvées d'accord avec celles qui se calculent au moyen des formules que Fresnel a établies pour la lumière (2358, 2359); le nombre adopté pour l'indice de réfraction du verre était 1,54.

La réflexion métallique des rayons de chaleur polarisés successivement dans les deux azimuts principaux, a aussi donné des résultats d'accord avec ceux que M. Jamin a trouvés avec la lumière (2467). De plus, MM. de la Provostaye et P. Desains ont constaté que la proportion de chaleur naturelle, réfléchie par les métaux, varie avec la nature de ces rayons. Ainsi, l'acier et le métal des miroirs réfléchissent, l'un 60, l'autre 64 pour cent de chaleur solaire, tandis que le premier réfléchit 83, et le second 85 pour cent de la

[1] *Annales de chimie et de physique*. 3e série, t. XXVII, p. 109.

chaleur d'une lampe de Locatelli. Les rayons provenant de cette dernière source, les plus transmissibles à travers le verre, se réfléchissent en moindre proportion que ceux qui ont traversé le sel gemme enfumé, d'où il résulte que le faisceau réfléchi n'a plus la même composition que le faisceau incident, phénomène analogue à celui qu'a observé M. Jamin, dans ses recherches sur la couleur des métaux (2470).

2520. Polarisation de la chaleur par réfraction simple. — Des expériences faites sur la transmission de la chaleur naturelle, à travers des lames de verre ou des piles de glace, ont prouvé que la chaleur se polarise par réfraction simple, et suivant les mêmes lois qne la lumière; qu'il y a égalité entre les quantités de chaleur polarisées dans les rayons réfléchis et réfractés; et que les piles de glace peuvent servir comme polariscopes calorifiques [1]. Comme polarisateur, elles forment l'instrument le plus avantageux parce qu'elles permettent d'expérimenter sur des faisceaux à grande section.

Les mêmes physiciens ont reconnu que les rayons calorifiques rayonnant obliquement d'une surface échauffée, sont polarisés, comme les rayons lumineux, dans un plan perpendiculaire au plan d'émission [2]. Par exemple, les rayons partant d'une surface de platine incandescente, en faisant un angle de 70° avec la normale, et ces rayons traversant une pile de deux lames de mica inclinées à 35° sur leur direction, ils ont vu le thermo-multiplicateur donner 24°,5, lorsque le plan de réfraction du mica était parallèle au plan d'émission, et 8°,3, quand il lui était perpendiculaire. Le platine étant un peu au-dessous du rouge, les angles ont été de 11°,2 et 3°,5. Le platine platiné et le fer oxydé ont donné des résultats beaucoup moins prononcés. Les rayons émis normalement ne donnent aucun signe de polarisation.

2521. Polarisation des rayons calorifiques de l'atmosphère. — M. E. Wartmann a constaté que la chaleur réfléchie par l'atmosphère est polarisée dans le même plan que la lumière qu'elle nous renvoie [3] : les rayons calorifiques traversaient une pile de mica, ou un gros prisme de Nicol, faisant fonction d'analyseur, et placés dans un tube en carton dirigé vers la région atmosphérique à explorer. La pile thermo-électrique, destinée à faire connaître les variations d'intensité de ces rayons pendant que le prisme tournait, était renfermée dans une grande caisse en bois, et entourée de coton cardé, pour intercepter la chaleur extérieure. L'analyseur recevait le mouvement de rotation, par l'intermédiaire d'une longue tige à manche de bois. La caisse pouvait tourner autour d'un axe horizontal en bois, de quantités mesurées par un arc divisé. M. Wartmann a reconnu, au moyen de cet appareil, que le plan de polarisation de la chaleur atmosphérique coïncide avec

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXX, 159.

[2] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXVIII, p. 252.

[3] *Bibl. univ. de Genève* (Arch. des Sc.), t. XVIII, p. 89; et *Ann. de ch. et de physique*, 3e série XXXIV p. 341.

celui de la lumière, et qu'il y a aussi coïncidence des points neutres, et des points de polarisation maximum.

2522. Rotation du plan de polarisation de la chaleur. — Le quartz agit sur les rayons de chaleur, comme sur les rayons lumineux, pour faire tourner leur plan de polarisation. Biot et Melloni ont constaté ce phénomène de la manière suivante : un faisceau cylindrique de rayons de chaleur d'une lampe de Locatelli, rendu plus intense au moyen de deux lentilles de sel gemme, comme il est dit plus haut (2517), traversait, avant de tomber sur le thermo-multiplicateur, deux piles de mica inclinées et tournées de manière à donner le minimum de chaleur. L'interposition d'une lame de quartz perpendiculaire à l'axe, détermina immédiatement une déviation à peu près double, dans l'aiguille du réomètre. Les mêmes physiciens ont constaté aussi que la rotation est dans le même sens que celle de la lumière, et qu'elle augmente avec la réfrangibilité des rayons calorifiques.

Il était très intéressant d'expérimenter la rotation du plan de polarisation de la chaleur par les liquides. C'est ce qu'ont fait MM. de la Provostaye et P. Desains [1]. La chaleur solaire, venant d'un point déterminé d'un spectre bien pur, étant reçue par un prisme analyseur tourné de manière à détruire toute la chaleur du faisceau ordinaire, un tube rempli d'essence de térébenthine ou d'une dissolution de sucre, était interposé, et aussitôt l'aiguille du thermo-multiplicateur indiquait le passage de la chaleur. L'effet disparaissait quand on faisait tourner convenablement l'analyseur. On a reconnu ainsi, que le plan de polarisation des rayons calorifiques tourne dans le même sens et de la même quantité que celui des rayons lumineux qui occupent les mêmes points du spectre. Cependant il y a une différence quand on opère sur les rayons rouges extrêmes; ce qui tient à ce que, le faisceau calorifique étant assez large, on observe les effets des rayons obscurs, qui sont les plus intenses, tandis que les rayons lumineux sur lesquels on expérimente sont plus réfrangibles, et doivent par conséquent être un peu plus déviés. On peut donc dire que les lois relatives à la rotation du plan de polarisation de la lumière s'appliquent à la chaleur. L'identité se poursuit dans les détails les plus minutieux; ainsi, une dissolution de 31 de camphre dans 69 d'essence de térébenthine fait éprouver sensiblement la même rotation à tous les rayons lumineux; et MM. de la Provostaye et Desains ont trouvé qu'il en est de même des rayons de chaleur qui accompagnent la lumière verte et la lumière rouge du spectre.

2523. Polarisation rotatoire magnétique de la chaleur. — M. E. Wartmann a constaté par divers moyens, entr'autres en se servant de l'appareil avec lequel il a étudié la polarisation des rayons calorifiques de l'atmosphère (2520), qu'un parallélipipède en verre pesant, de 29^{mm} d'épais-

[1] *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. XXX, p. 267.

seur, soumis à l'action d'un fort électro-aimant, dévie le plan de polarisation de rayons de chaleur polarisés par un prisme de Nicol.

2524. Conclusion. — Il résulte de ce qui précède, que la théorie des ondulations qui se prête si heureusement à l'explication des phénomènes lumineux, s'applique de la même manière à la chaleur rayonnante. Il devient aussi évident que la chaleur et la lumière sont dues à la même cause, aux vibrations de l'éther, et que les mêmes vibrations peuvent produire les deux sortes d'effets, quand leur amplitude est suffisante, et quand leur rapidité est comprise entre certaines limites.

Il resterait à expliquer par les mouvements de l'éther, ou par son accumulation dans l'intérieur des corps ou à leur surface, les phénomènes si complexes que présente l'*électricité*. Peut-être, ces effets sont-ils produits par les vibrations longitudinales qui accompagnent les vibrations transversales correspondantes à la chaleur et à la lumière (2342). Mais, s'il est assez facile de se rendre ainsi compte des faits relatifs à la propagation de l'électricité, il semble bien difficile de concevoir comment des mouvements vibratoires peuvent produire des attractions et des répulsions. Cependant, nous ne devons pas regarder cette difficulté comme insurmontable, surtout si nous nous rappelons que la polarisation a été longtemps regardée comme un fait incompatible avec le système de l'éther, avant que l'idée lumineuse des vibrations transversales ne fût venue anéantir l'objection, et jeter une clarté inattendue sur toute une série de phénomènes nouveaux. Si cette difficulté était une fois vaincue, on entreverrait la possibilité de rattacher au système de l'éther, le grand phénomène de la *gravitation universelle*, comme on a tenté déjà de le faire, mais sans succès. Alors tous les phénomènes de la nature, dans leur variété infinie, seraient produits par une seule et même cause; simplicité admirable, bien en harmonie avec l'idée que nous nous faisons de la puissance et de la majesté de l'auteur de toutes choses. Faire ressortir cette grande unité de cause, de l'étude détaillée et de l'interprétation logique des faits, telle est la mission que doit se proposer aujourd'hui la science.

FIN.

ERRATA.

TOME I (Voir à la fin du premier volume).

page	*ligne*	*au lieu de :*	*mettez :*
139	dans la note.	t. XIII	t. XXIII.
140	24	huit lames.	douze lames.
140	27	dans tous les cas.	si le bec de la pompe est retiré rapidement.
140	28	les lames.	dans tous les cas les lames.
207	5	un tube capillaire	un tube suffisamment gros.
207	14	*ajoutez :* il faut avoir soin d'enduire l'intérieur du tube d'une légère couche de saindoux ; ou de gomme arabique, s'il doit recevoir de l'alcool.	
207	5 en remont.	a un diamètre moindre que 3,6 fois sa hauteur	a une hauteur égale ou supérieure à 3,6 fois son diamètre.
208	5 en desc.	entre 2 et 3,6	entre 3,6 et 3.
503	10	B	H
510	dans le tableau, 6me nombre, 3me colonne.	0,1582	0,6582. (*Nota.* L'erreur a entraîné celle des nombres qui sont au-dessous.)

TOME II (Voir à la fin du deuxième volume).

199	21	la pointe *a*	la pointe *b*.
200	2	$(t'+15°)$	$(t+15°)$.
420	10	l'alimenter	s'alimenter.
430	12 en rem.	1795	1695.
505	2	*vibroscope*	*gyroscope.*
656	3 en rem.	vent	temps.

TOME III.

11	18	l'aimant *ac*	l'aimant *mn*.
14	7	(*fig.* 879)	(*fig.* 873).
99	18	*s'attirent et les fluides de sens contraire se repoussent*	*se repoussent et les fluides de sens contraire s'attirent.*
446	20	produite	produites.

TOME IV.

204	5	de la potasse	de la soude.
281	10	catacaustique	diacaustique.
De 320 à 337 excl. la pagination porte, par erreur, 221,......236.			
346	5	complémentaires	accidentelles.

TABLE DES MATIÈRES

DU QUATRIÈME VOLUME.

LIVRE VI.

OPTIQUE.

CHAP. I. — DE LA NATURE DE LA LUMIÈRE. — PHOTOMÉTRIE.

§ 1. — **De la nature de la lumière et de son origine.** — Hypothèses. Sources. Phosphorescence. 6

§ 2. — **Propagation de la lumière.** 14

I. *Propagation en ligne droite. Ombres.* — Rayon visuel. Ombre, pénombre, chambre noire simple. 14

II. *Mesure de la vitesse de la lumière.* — Méthode de Rœmer. Aberration. Mesure sur de faibles distances. 19

§ 3. — **Photométrie.** — Lois de l'intensité. Photomètres. Absorption par les milieux. 26

CHAP. II. — CATOPTRIQUE.

§ 1. — **Lois de la réflexion. Pouvoirs réflecteurs.** 40

I. *Lois de la réflexion.* — Réflexion diffuse. 40

II. *Pouvoirs réflecteurs.* 44

§ 2. — **Réflexion sur les surfaces planes, et instruments d'optique qui s'y rapportent** 46

I. *Miroirs plans.* — Applications diverses. Images par réflexion multiples. Rayons marchant en ligne courbe. 46

II. *Goniomètres de réflexion.* — Mesure de l'angle d'un prisme. 59

III. *Héliostats.* 63

§ 3. — **Réflexion sur les surfaces courbes et instruments d'optique qui s'y rapportent.** 72

I. *Disposition des rayons réfléchis.* — Caustiques. Cas des miroirs sphériques. 72

II. *Miroirs sphériques à petite ouverture.* — Formule. Foyers conjugués. Images focales. Images vues dans les miroirs sphériques. 77

III. *De quelques miroirs courbes non sphériques.* — Phares de réflexion. Anamorphoses. 86

CHAP. III. — DIOPTRIQUE.

§ 1. — **De la réfraction simple et de ses lois.** 90

I. *Réfraction dans les solides et les liquides.* — Lois de la réfraction. Angle limite. 90

II. *Réfraction atmosphérique. Mirage.* — Tables de réfraction. 99

§ 2. — **Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces planes.** — Diacaustiques 108

I. *Rayons entrant par la surface plane d'un milieu indéfini.* 108

II. *Rayons traversant un milieu terminé par des plans. Prismes.* — Lame à faces parallèles. Prismes. Déviation. Chambres claires. 114

§ 3. — Réfraction dans les milieux terminés par des surfaces courbes. Lentilles. . 123

I. *Rayons entrant par une surface sphérique, dans un milieu indéfini.* 123

II. *Lentilles.* — Formule. Cas de plusieurs lentilles. Point lumineux hors de l'axe. Images focales. . . 128

III. *Instruments relatifs aux images formées par les lentilles.* — Chambres noires. Mégascopes. Phares de réfraction. 142

§ 4. — Mesure des indices de réfraction. 155

I. *Indices de réfraction des solides et des liquides.* — Méthode de Newton; par la réflexion totale.. 155

II. *Indice de réfraction des gaz.* — Vapeur d'eau. Vapeurs à températures élevées. 165

CHAP. IV. — CHROMATIQUE.

§ 1. — Dispersion. 177

I. *Théorie de la dispersion.* — Spectre. Différente réfrangibilité des rayons. Recomposition de la lumière. 177

II. *Raies du spectre.* — Raies du spectre des flammes. Application aux analyses chimiques. Raies du spectre de la lumière électrique. . 191

§ 2. — Décomposition de la lumière par absorption. — Polychroïsme. Hypothèse de Brewster. 204

§ 3. — Décomposition de la lumière par réflexion. Théorie des couleurs. — Couleurs des corps. Mélange des couleurs. Nomenclature. 213

§ 4. — Propriétés particulières des rayons colorés. 224

I. *Effets chimiques.* — Spectre chimique. Rayons continuateurs. Comparaison des rayons chimiques et lumineux. Photographie. Images de Moser. 224

II. *Propriétés éclairantes et calorifiques.* 247

III. *Effets phosphorogéniques.* — Spectre phosphorogénique. Phosphoroscopes. Fluorescence.. . . . 249

§ 5. — Achromatisme. 255

I. *Dispersion et pouvoir dispersif.* 255

II. *Prismes achromatiques.* — Diasporamètres. 261

III. *Lentilles achromatiques.* — Cas de deux lentilles. 266

§ 6. — Phénomènes météorologiques dépendant de la décomposition de la lumière. 269

I. *Absorption et réflexion de la lumière par l'atmosphère.* — Couleur bleue. Crépuscule, aurore 269

II. *Arc-en-ciel.* 277

III. *Halos, parhélies et phénomènes concomitants.* 288

CHAP. V. — DE LA VISION.

§ 1. — De la vision simple. . . . 299

I. *Description de l'organe de la vue et mécanisme de la vision.* . . 299

II. *De la netteté de l'image et des conditions de sa formation.* . . . 304

III. *Ajustement de l'œil, besicles.* — Rôle du cristallin. Défauts de la vue. Optomètres. 308

IV. *Phénomènes relatifs à la sensibilité de la rétine.* — Durée de l'impression. 319

V. *Rapport entre le jugement et la sensation.* — Vision binoculaire. Stéréoscope. 327

VI. *Appréciation des couleurs. Couleurs accidentelles.* 343

§ 2. — Vision aidée des instruments grossissants. 349

I. *Microscopes.* — Loupe. Microscope composé. Application à la mesure des indices de réfraction. 349

II. **Lunettes et télescopes.** — Lunettes astronomiques, terrestres. Télescopes de réflexion, microscope catadioptrique. 366

CHAP. VI. — SYSTÈME DES ONDULATIONS, ET COMPARAISON A CELUI DE L'ÉMISSION.

§ 1. — Du système des ondulations. 384

I. *Principe du système des ondulations.* — Principe d'Huyghens; des interférences. Longueur d'ondulation. 384

II. *Explication de la réflexion et de la réfraction.* — Réfracteurs interférentiels. Influence du mouvement d'un milieu sur l'éther. Scintillation. 396

III. *Décomposition de la lumière. Action sur les corps.* 411

§ 2. — Comparaison du système de l'émission à celui des ondulations. 414

I. Réflexion et réfraction dans le système de l'émission. 414

II. *Expériences qui décident entre les deux systèmes.* 417

CHAP. VII. — DE LA DIFFRACTION. RÉSEAUX.

§ 1. — Diffraction. 423

I. *Diffraction par des bords rectilignes indéfinis.* — Bord d'un écran. Fente. Écran étroit. . . . 423

II. *Diffraction par des écrans dont toutes les dimensions sont très petites.* — Apparence au foyer des lunettes. 434

§ 2. — Réseaux. 438

§ 3. — Météores dépendant de la diffraction. — Arcs-en-ciel surnuméraires. Couronnes. . . . 445

CHAP. VIII. — ANNEAUX COLORÉS.

§ 1. — Anneaux dans les lames minces. 451

§ 2. — Couleurs dans les lames épaisses. 463

CHAP. IX. — DOUBLE RÉFRACTION.

§ 1. — Cristaux à un axe. 468

I. *Phénomènes et lois de la double réfraction.* — Construction d'Huyghens. 468

II. *Micromètre à double image de Rochon.* 481

§ 2. — Cristaux à deux axes. . 484

CHAP. X. — POLARISATION RECTILIGNE.

§ 1. — Caractères de la lumière polarisée et explication de la polarisation. 489

I. *Définition de la polarisation. Polariscopes.* 489

II. *Explication de la polarisation dans le système des ondulations.* — Direction des vibrations de l'éther. 493

§ 2. — Polarisation par réflexion et réflexion de la lumière polarisée. 498

I. *Lois de la polarisation par réflexion.* — Angle de polarisation. Polarisation de l'atmosphère. . . . 498

II. *Réflexion de la lumière polarisée.* — Formules de Fresnel. Changement du plan de polarisation. 508

III. *Théorie de la polarisation par réflexion.* 515

§ 3. — Polarisation par réfraction, et réfraction de la lumière polarisée. 519

I. *Lois de la polarisation par réfraction.* — Piles de glace. Polarisation par émission. 519
II. *Réfraction de la lumière polarisée et théorie de la polarisation par réfraction.* 524

§ 4. — Polarisation par double réfraction, et théorie de la double réfraction. 527

I. *Polarisation par double réfraction et double réfraction de la lumière polarisée.* 527
II. *Applications à la photométrie et à la polarimétrie.* — Résultats photométriques. 530
III. *Théorie de la double réfraction.* — Construction des rayons réfractés. Réfraction conique. Axes optiques. 538

CHAP. XI. — POLARISATION CHROMATIQUE.

§ 1. — Rayons parallèles. 551
I. *Couleurs dans les lames cristallisées.* — Influence de l'épaisseur. Théorie de Fresnel. 551
II. *Couleurs dans les corps dont la structure a été modifiée.* 564

§ 2. — Lumière convergente. . . 567
I. *Anneaux dans les cristaux à un axe.* — Théorie de Fresnel. . . . 571
II. *Courbes dans les cristaux à deux axes.* — Angle des axes. . . 573
III. *Franges de formes diverses. Dichroïsme.* — Houppes. Astérie. 577

§ 3. — Applications de la polarisation chromatique. — Microscope polarisant. Étude de l'isomorphisme; de l'élasticité. . 583

CHAP. XII. — POLARISATION CIRCULAIRE ET ELLIPTIQUE.

§ 1. — Caractères et origine de la polarisation circulaire et elliptique. — Polariscopes circulaires. 589

§ 2. — Polarisation elliptique par réflexion. 595
I. *Réflexion totale et réflexion métallique.* — Parallélipipède de Fresnel. Différence de phase. Couleur des métaux. 595
II. *Polarisation elliptique par réflexion sur les corps transparents.* — Formules de Cauchy. Réflexion métallique sur des corps non métalliques. 605
III. *Lumière polarisée dans la production des anneaux par les lames minces.* 610

CHAP. XIII. — ROTATION DU PLAN DE POLARISATION.

§ 1. — Polarisation rotatoire moléculaire. 613
I. *Phénomènes. Lois. Théorie.* — Solides. Liquides. Mesure du pouvoir rotatoire. Théorie de Fresnel. 613
II. *Applications de la polarisation rotatoire.* — Dissolutions. Études chimiques. Saccharimétrie. Hémiédrie cristalline. 632

§ 2. — Polarisation rotatoire magnétique. Sens de la rotation. Lois. 643

CHAP. XIV. — SUPPLÉMENT A L'ÉTUDE DE LA CHALEUR RAYONNANTE. — CONCLUSION.

Interférence ; polarisation ; double réfraction ; polarisation rotatoire de la chaleur. 654

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

TABLE ALPHABÉTIQUE ET ANALYTIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LES QUATRE VOLUMES.

NOTA. — Les chiffres romains indiquent les tomes, et les chiffres arabes, les pages.

A

Aberration des étoiles, relation avec la vitesse de la lumière, IV, 22.

A. *de réfrangibilité*, ou *chromatique* des lentilles, IV, 183; de l'œil, 307.

A. *de sphéricité* des miroirs sphériques, IV, 78, 83; dans la réfraction par les surfaces sphériques, 124; des lentilles, 139; de l'œil, 304.

Absorption, dans la préparation des gaz, I, 297; des gaz par les liquides, 357; des gaz par les solides poreux, 141, 363; — développe de la chaleur, 364; II, 466.

A. *de la chaleur* par les lames diathermanes, II, 49; des différents rayons, 58, 65; loi 62, des rayons calorifiques du spectre solaire, II, 65.

A. de la chaleur solaire par l'atmosphère, II, 534.

A. *de la lumière* par les milieux, loi, IV, 37; mesures photométriques, 38; par l'atmosphère, 38; théorie, 412, par les substances colorées, formules d'absorption, 205; représentations, graphiques, 206; Influence de la chaleur, 207; explication dans le système des ondulations, 412.

A. à travers les cristaux, IV, 580; inégale des rayons ordinaire et extraordinaire, 580.

A. des rayons chimiques par les milieux diaphanes, 230.

Accès de facile réflexion et de facile transmission, IV, 456.

Accidentelles (auréoles, couleurs), IV, 344.

Accord consonnant ou dissonnant; parfait, I, 501.

Accorder les tuyaux d'orgue, I, 541, par les battements, 515.

Achromatisme (α *privatif*, χρῶμα, *couleur*); son but, IV, 255; premiers essais, 260; — des prismes, 261; cas de deux prismes, 262; — des lentilles, 266; cas de deux lentilles, 268; lentilles liquides, 269.

A. de l'œil, IV, 307; du microscope, 355; des lunettes grossissantes, 368, 369, 376.

Achromatopsie (α, χρῶμα, ὄψις, *vue*), IV, 344.

Acide *carbonique* liquéfié par l'appareil de M. Thilorier, II, 353; solidifié, 354.

— *tartrique* et tartrates, pouvoir rotatoire, IV, 633; dispersion rotatoire, 638.

Acides, leur décomposition par la pile, III, 448.

Acier (effets de la trempe sur l'), I, 431; couleurs irisées à la surface, 432; sa force coërcitive, III, 16, 41.

Acoustique (ἀκούω, *entendre*), I, 448.

Actinomètre (ἀκτίς, μέτρον, *mesure*), pour évaluer la chaleur solaire, II, 533.

pour évaluer la température de l'espace, 572.
A. électrochimique, IV, 228.
Actions chimiques considérées comme source de chaleur, II, 467 (voy. SOURCES DE CHALEUR); comme sources d'électricité, III, 316 (voy. SOURCES D'ÉLECTRICITÉ).
Adhésion capillaire, I, 210; des liquides aux ajutages, 232; produite par les gaz qui s'écoulent, 346.
Aérostats (*aer*, *air*; *stare*, *se tenir*); découverte, I, 380; premiers voyages aériens, 381; construction et manière de les remplir, 383; calcul de la force ascensionnelle, 384; manière de les gouverner, 385; applications à l'art de la guerre, 388.
Aérostiers, I, 388.
Agents *naturels*, I, 1, 11.
Aigrette *électrique*, III, 129; bruit qui l'accompagne, 129; différence entre l'aigrette négative et l'aigrette positive, 130; dans l'air raréfié, dans divers milieux, 131.
Aiguille *aimantée*, III, 18; libre, 19; manière de la fabriquer, 45; des boussoles, 63; d'inclinaison, 22; sa position dans les différents azimuts, 23; astatique, 24. — Variations de l'aiguille aimantée, 75 (voy. VARIATIONS).
A. *électrique*, III, 94; de Haüy, 292; électro-magnétique tournant, sous l'influence du globe, III, 611.
A. *thermo-électrique*, III, 517, 380.
Aimant *naturel*, artificiel, III, 7 (voy. AIMANTATION). Propriétés générales des aimants, 7; pôles, 9. — Théorie des deux fluides magnétiques, action sur le fer doux, 12; éléments magnétiques, 14; action de la terre, 18, 650.
— Comparaison de la force des A., III, 31; moment magnétique, 32; distribution de la force, 33, 35 (voy. MAGNÉTISME). — Circonstances qui influent sur la force des aimants; trempe, 44; effets de la surcharge, 50; des armatures, 48; de la chaleur, 51.
— Actions sur les courants, III, 648; assimilation aux solénoïdes, 656; théorie électro-magnétique, 657; action d'un aimant sur le fer doux, 661; rotation des courants par les aimants, 662; des aimants par les courants, 664.
A. *terrestre* (hypothèse de l'), III, 20, 650.
A. *de Ceylan*, III, 362.
Aimantation par les aimants, III, 37; méthode de la simple touche, 38; de la double touche, 39; — par la terre, 43; par les électro-aimants, III, 608.
A. par les courants, hélices dextrorsum et sinistrorsum, III, 602; — par l'électricité ordinaire, 603; circonstances qui influent sur l'aimantation par la décharge, 604; — par les courants continus, 606.
— Mouvements moléculaires pendant l'aimantation, 620; coexistence de deux états magnétiques différents, 622.
— Théorie électro-magnétique de l'aimantation, III, 658.
Air, pesanteur, I, 275; composition, 366; lois de la compression, 298.
— comprimé, application aux travaux hydrauliques, I, 328; ses effets, 329, II, 447.
— manière de le faire vibrer, I, 453; sa température, II, 548 (voy. TEMPÉRATURE); indice de réfraction, IV, 167 (voy. ATMOSPHÈRE).
Ajustement, de l'œil d'après la distance, IV, 308; hypothèses diverses, 311; rôle du cristallin, 313.
Ajutages (*d'ajouter*), action sur l'écoulement des liquides, I, 231; des gaz, 345.
Alambic (AL, *article* arabe; ἄμβιξ, *vase*), II, 351.
Alcarazas (mot arabe), II, 325.
Alcaloïdes, propriétés rotatoires de leurs dissolutions, IV, 622, 634.
Alcool *absolu*, I, 182; sa congélation partielle, 356; décomposition par la pile, III, 451.
Alcoomètres (*alcool*, μέτρον, *mesure*), I, 178; centésimal, 182 (v. ARÉOMÈTRE).
Alizés (vents), (*alis*, vieux français, *régulier*), II, 603.
Alliages, loi de leur élasticité, I, 404; de

leur chaleur spécifique, 260 ; de leur chaleur latente, 316, 320.
Altitude, mesurée au moyen du baromètre, I, 376 ; au moyen de la température d'ébullition, II, 337.
Alternatives (méthode des), III, 147; *voltaïques*, 399.
Ammonium, III, 148.
Anaclastique (ἀνάκλαω, *réfracter*), IV, 90 (*v.* Dioptrique).
Analyse, chimique par les raies du spectre, IV, 198; — d'un mélange de sons, I, 545.
Analyseur *polariscopique*, IV, 490 (*v.* Polariscope).
Anamorphoses (ἀνά, *à travers*, μορφή, *forme*), par réflexion, IV, 88.
Anche battante, I, 547; libre, 548; théorie, 548; instruments à anche, 550.
Anémomètres (ἄνεμος, *vent*; μέτρον), II, 593; de rotation, 594; enregistreurs, 596; enregistreurs électro-magnétiques, III, 845.
Anémométrographes, II, 596; III, 845.
Anémoscopes (ἄνεμος, σκοπέω, *observer*), II, 591; enregistreurs, 592, III, 845
Anéroïde (baromètre) (α, ῥέω, *couler*), I, 291.
Angle des cristaux (mesure de l'), IV, 59, des prismes, 62 (*v.* Goniomètre).
— *des axes* des cristaux à deux axes, IV, 576.
A. *de dispersion*, IV, 256.
A. *d'incidence* et de *réflexion*, II, 40; IV, 40.
A. *de réfraction*, IV, 90, 92.
A. *limite* de réfraction, IV, 94; explication dans le système des ondulations, 399; de l'émission, 417.
A. *de polarisation*, IV, 499; sa mesure, 500, 606; relation avec l'indice de réfraction, 501.
Animaux dans le vide, I, 321; relation entre le climat et la couleur, II, 101; — à sang chaud ou froid, température, II, 517, 520; hibernants, 520; — produisent de l'électricité, 383 (*v.* Électricité physiologique). — Action des courants, 396 (*v.* Courants).
A. *phosphorescents*, IV, 10.
Anneaux *colorés dans les lames minces*, IV, 451, 453; lois de Newton, 455; théorie des accès, 457; explication des anneaux réfléchis dans le système des ondulations, 458; *Ann. à centre blanc*, 459; A. transmis, 460. — A. vus obliquement, 461; vérification expérimentale, 462. — Sont polarisés, IV, 610; A. formés dans la lumière polarisée, 611.
A. *dans les lames épaisses*, de Newton, IV, 463; du duc de Chaulnes, de M. Pouillet, théorie, 464; de M. Babinet, 466.
A. autour de l'axe des cristaux à un axe, IV, 568; explication, 570; cas des cristaux à deux axes, 573; A. du quartz, sans croix, 619.
A. par diffraction, IV, 434; au foyer des lunettes, IV, 436; effets des diaphragmes, 437.
A. produits par les corpuscules, IV, 447; couronnes, 449.
A. par réflexion dans un tube, IV, 52.
A. produits par l'électricité; de Prietsley, III, 178; de Nobili, 464.
Anorthoscope, IV, 225.
Anthélie (ἀνθήλιος, *opposé au soleil*), IV, 289; explication, 296.
A. ou *cercle d'Ulloa*, IV, 450.
Aplatissement *de la terre*, I, 111; sa mesure, 112.
Apophyllite, anomalies dans la lumière polarisée, IV, 572.
Apothéose, ou *ombres frangées*; explication, IV, 450.
Appareil de Biot pour la polarisation rotatoire, IV, 623; de Cavendish, I, 128; à commotions par l'induction, III, 681, 718; — à couronne, I, 853; électro-musical, III, 610; de Haldat, I, 152; d'Inghenousz, II, 134, de Leslie, II, 77; d'Herschel, IV, 569; de Melloni, II, 32; de Norremberg, IV, 552; de Ruhmkorff, III, 722, 749; de Soleil pour l'angle des axes des cristaux, IV, 570; tournant de Ritchie, III, 610; de Thilorier, II, 353 (*v.* Machines).

Araignée *de Franklin*, III, 109.
Arbre *de Saturne*, III, 508.
Arc-en-ciel, IV, 277, marche des rayons lumineux dans une sphère d'eau, 278 ; rayons efficaces, 279 ; explication de l'arc intérieur, 282 ; de l'arc extérieur, 283 ; arcs surnuméraires, 284 ; expér. sur la théorie de l'arc, 285 ; la lumière est polarisée par réflexion, 506.
— à double courbure ; horizontal, IV, 286 ; croisé, renversé, 287.
— *supplémentaire*, explication par la diffraction, IV, 445.
— *blanc*, ou *cercle d'Ulloa*, IV, 450.
Arcs *tangents des halos*, IV, 289, 293, 294.
Arc voltaïque, III, 429 ; transport des particules dans l'arc ; influence des électrodes, 430 ; leur échauffement inégal, 432 ; action du magnétisme, 434 ; effets calorifiques, 436 ; lumineux, 439 ; éclairage électrique, applications, 441 ; *régulateurs* de la lumière électrique, 849 ; stratification de la lumière de l'arc, 733.
Archet, théorie, I, 563.
Archimède (*principe d'*), I, 157 ; applications aux corps flottants, 161 ; applications diverses, 163.
— (*problème d'*), I, 160.
Aréomètre (ἀραιός, *léger* ; μέτρον), A. *balance*, I, 170 ; *de Farenheit*, 175 ; *à poids constant*, 177 ; de Beaumé, 178.
Armature *des aimants*, III, 48 ; des aimants naturels, 49 ; des électro-aimants, influence sur leur force, 615.
Armatures de la bouteille de Leyde, III, 162.
Arrosage *du globe*, II, 647.
Arrosoir *magique*, I, 296 ; électrique, III, 110.
Astérie (ἀστήρ, *étoile*) des cristaux, IV, 582.
Astronomie, définition, I, 3.
Atmidomètre (ἀτμός, *vapeur* ; μέτρον), II, 631.
Atmosphère, I, 276 ; composition, I, 365 ; hauteur, 366 ; *id.* par le crépuscule, IV, 275 ; phénomènes barométriques, I, 368 (*v.* Baromètre) ; — température, II, 548 (*v.* Température) ; rôle dans la distribution de la chaleur à la surface du globe, 575 ; — état *électrique*, III, 263 (*v.* Électricité atmosphérique).
— *réfraction*, IV, 99 ; décompose la lumière, 270 ; éclat dû à la réflexion, 271 ; sa mesure, 272 — polarisation de la lumière réfléchie, 506 ; de la chaleur réfléchie, 657.
Atomes (α *priv*, τέμνω, *couper*), I, 38 (*v.* Molécules).
Atomiques (*poids*), relation avec la chaleur spécifique, II, 254, 260 ; avec le magnétisme spécifique, III, 782.
Attraction *universelle*, I, 75 ; ses lois, 76 ; historique, 132 ; — moléculaire ou *cohésion*, 135 ; est sensible chez les gaz, 307 ; comment elle paraît varier avec la distance, 409.
A. *et répulsion capillaire*, I. 209.
A. *magnétique*, III, 7 ; lois, méthodes des oscillations, 28 ; balance de torsion, 29.
— d'un aimant par un courant, III, 600.
A. *électrique*, III, 93 ; explication, 107 ; lois par la balance électrique, 134 ; méthode des oscillations, 137 ; balance bifile et expér. de M. Harris, 137.
Atwood (*machine d'*), I, 87 ; électro-magnétique, III, 842.
Audition, I, 451, 631 (*v.* Ouïe).
Auréoles *accidentelles* (vision), IV, 347.
Aurore et *crépuscule*, IV, 273 ; couleurs de l'aurore, 274.
A. *boréales* ou *polaires* ; description, III, 273 ; explication, 276 ; action sur l'aiguille aimantée, III, 86, 273.
Averse, action sur le baromètre, II, 657.
Avertisseur des télégraphes électriques, III, 803.
Axe *cristallographique* des cristaux, I, 394 ; *optique*, IV, 472, 543 ; définition exacte, 551 ; détermination, et mesure de l'angle, 576 ; d'élasticité des cristaux, 539.
A. d'un miroir sphérique, II, 43, et IV, 77 ; *principal* d'une *lentille*, 129 ; secondaire, 137.

B

Bain *électrique*, III, 407.

Balance (*bis*, *lanx*, *bassin*), théorie, I, 121; sensibilité, 122; — de précision, 124; de Roberval, 126; hydrostatique, 159.

B. *magnétique* de Coulomb, III, 29; *électrique*, *id.* 134; bifile de Harris, 137; — *électro-magnétique*, 532.

Balancier des machines à vapeur; forme d'égale résistance, I, 425.

B. *électrique*, III, 164.

Ballons, I, 380 (*v.* Aérostat).

Banc *de diffraction*, IV, 391, 425; de Melloni, II, 48; de Savart, I, 497; de résistance électro-dynamique, III, 567.

Banquise des mers polaires, II, 586.

Barocentrique (*courbe*), I, 113.

Baromètre (βάρος, *poids* : μέτρον, *mesure*), théorie, I, 275; de précision, 282; à cadran, 290; sans mercure, 291; tronqué, 332; suisse, 377.

— (corrections du), I, 284; observation au moyen de l'électro-magnétisme, III, 845; — usages, I, 289; mesure des hauteurs, 376; formule de Laplace, 378.

— (hauteurs moyennes du), I, 368; variations accidentelles, 372; var. horaires, 374; indique les changements de temps, 289; explication, II, 656.

Barométrographe (*baromètre*, γράφω), I, 369; photographique, 370; électro-magnétique, III, 843.

Baroscope (βάρος, σκοπέω, *voir*), I, 276.

Barre (lois des températures dans une), II, 140, 145; — de Savart, I, 497.

Barreaux *aimantés*, III, 7; disposition dans leur *boîte*, 48.

Base *de sustentation*, I, 82.

Bateaux *à vapeur*, invention, II, 430; propulseur à hélice, 433; disposition des chaudières, 434.

Battements, I, 513; son résultant, 514, usage pour accorder l'orgue, pour évaluer le nombre des vibrations, 515; nouvelle théorie, 628.

B. dans le fer pendant le passage intermittent d'un courant, III, 625.

Batterie *électrique*, III, 164; charge par cascade, 164; manière de régler la charge, 166.

— *électro-tellurique*, III, 682.

— *galvanique* ou *voltaïque*, III, 308; voltaïque à gaz, 354.

Bec *d'Argant*, II, 343; multiple des phares, IV, 35, 153.

Bélier *hydraulique*, I, 237.

Bémols et *dièzes*, I, 506.

Besicles (*bis*, *oculi*), IV, 316, 317.

Bi-prisme (interférences), IV, 392.

Bi-quartz de M. Soleil, pour la lumière polarisée, IV, 618.

Bobine de Ruhmkorff, III, 722; cloisonnée, 724; effets, 726; applications, 737; II, 449.

Boîte *à étoupe*, ou *presse-étoupe*, I, 334.

Bouche, ou embouchure des tuyaux d'orgue, I, 524.

Bouilleurs des chaudières à vapeur, II, 418.

Bouquet *magique*, IV, 85.

Bourdons des jeux d'orgue, I, 526.

Boussole (*buxola*, *boîte*), *de déclinaison*, III, 59; de Gambey, 61; marine, 62; — historique, 63.

— *d'inclinaison*, III, 68; des variations, 75; des intensités, 27.

B. des sinus, III, 528; des tangentes, 529.

Bouteille *de Leyde*, III, 161; l'électricité reste sur le verre, 162; mouvements produits par l'électricité libre, 163.

— *électrométrique*, III, 167, 593.

Bouton *de Barthon*, IV, 444.

Brachistochrone (βράχιστος, *le plus court*; χρόνος, *temps*), I, 94.

Briquet *à pierre*, II, 453; à air, 460; à gaz hydrogène, I, 364; électrique, III, 175.

Brise de terre ou de mer, II, 601, 606; des montagnes, 602.

Bronze, influence de la trempe, I, 433.

Brouillards, II, 645; locaux, 646; secs, 646.

Bruit, I, 515 ; analyse des sons qui le composent, 516 ; bruit, *son* brof, 516 ; limite de durée, 517.
Brume, II, 646.

C

Cabinets *parlants*, I, 488.
Cadavres animés par l'électricité, III, 396.
Caisses *catoptriques*, IV, 57 ; des instruments à cordes, I, 543, 573.
Caléidophone (καλός, εἶδος, φωνή), I, 611
Calorie, *unité de chaleur*, II, 242.
Calorifères *à eau chaude*, II, 157 ; à air, 240 ; à vapeur, 378.
Calorimètre de *glace*, II, 246 ; do M. Regnault, 255 ; compensateur, 306 ; à mercure, 376 ; de Rumfort, 370, 478 ; do M. Despretz, 480, 521 ; do Dulong, 484, 524 ; de Dauriac et Sahuquié, 484 ; de MM. Fabre et Silbermann, 485.
Calorique, II, 9 (*voy.* Chaleur).
Camera *lucida*, IV, 121 (*voy.* Chambre claire).
Capacité *d'un vase* (évaluation do la), I, 184 ; comparaison à cello d'une division, 267 ; — variation par la compression, 406 ; par la chalour, II, 171.
C. *calorifique* des corps, II, 241 (*voy.* Chaleur spécifique).
Capillarité, description ot lois des phénomènes, I, 185 ; théorie, 194 ; relation avec la forme de la surface, 204 ; équilibre d'un cylindre liquide sans pesanteur, 207 ; action de la chaleur, 211 ; mouvemonts produits par la capillarité, 208 — est une source de chaleur, II, 466 ; d'électricité, III, 357.
Carillon *électrique*, III, 108 ; application à l'électricité atmosphérique, 241 ; C. à bouteille de Leyde, 163.
Carreau *étincelant*, III, 128 ; magiquo, 128, 161 ; fulminant, 172.
Casse-vitre, I, 293.
Cascade (*charge des batteries par*), III, 164.
Castor et Pollux, III, 227.
Catacaustique, IV, 72 (*v.* Caustique).
Cathétomètre (κάθετος, *vertical*, μέτρον, I, 16.
Catoptrique, IV, 40 (*voy.* Réflexion de la lumière, miroirs).
Causes *naturelles*, I, 10.
Caustiques (καυστικός, *brûlant*) par réflexion, IV, 72 ; des miroirs sphériques, 72 ; construction do la génératrice, 73. — par réfraction, IV, 108 ; cas d'uno surface plane, 109 ; cas des lentilles, 139.
Cautérisation par les fils incandescents, par les courants, III, 412.
Centre des *forces parallèles*, I, 63 ; de gravité, 79 ; do pression, 153 ; de poussée, 158.
C. *optique* d'une lentille, IV, 135 ; position, 136.
Cerceau *électro-dynamique*, IV, 674.
Cercle *répétiteur*, I, 30 ; — *chromatique*, IV, 223.
C. *parhélique* des halos, 289 ; explication, 295 ; d'Ulloa, 450.
Cerf-volant *électrique*, III, 241.
Chaîne *galvanique*, III, 408 ; magnétique, 12.
Chaleur, effets généraux, II, 6 ; de sa nature, 7 ; systèmes de l'*émission* et des *ondulations*, 9 ; — expl. dos phénomènes de la chalour dans ce dernier système, 71 ; polarisation de la chaleur, III, 655 ; double réfraction, 655 ; impressions de chaleur, II, 73 ; effets sur les corps, 515 (*v.* Équivalent mécanique de la chaleur) ; — influence sur les phénomènes capillaires, I, 211 ; sur les propriétés physiques des corps solides, 428, 435 ; — sur les aimants, III, 52 et 784.
C. *animale*, II, 517 ; mesure de la quantité de chaleur dégagée, 520 ; origine do la chaleur animale, 522.
C. des végétaux, II, 524.
C. *atmosphérique*, II, 548 (*v.* Température de l'air).
C. *latente*, II, 9, do liquidité, 286 ; de dissolution, 304 ; — de la glace, mesure, 305 ; des métaux, 310, 316 ; liaison avec

la chaleur spécifique, 311 ; avec l'élasticité, 317.
— des vapeurs ou d'élasticité, II, 323 ; mesure, 369 ; sons différentes pressions, 371 ; des liquides autres que l'eau, 376.
— absorbée par la dilatation des gaz, 460 ; relation avec le travail mécanique, 509.
C. spécifique, II, 241 ; méthode des mélanges, 243 ; de la fusion de la glace, 245 ; du refroidissement, 246 ; — résultats généraux, 248 ; capacité de l'eau, 252 ; sels hydratés, 254, — loi des atomes, 254 ; expér. de M. Regnault, 255, 257 ; cas des corps composés, 260.
— des liquides, II, 258, 258 ; de la glace, 902.
— des gaz, II, 267 (voy. Gaz).
C. solaire, II, 530 ; quantité fournie, 532 ; proportion absorbée par l'air, 534 ; envoyée à la terre, 536 ; température aux divers points du disque solaire, 538.
— de la terre, exp. dans les mines, II, 525 ; dans les puits artésiens, 526 ; feu central, 527 ; résultats du calcul, 529.
C. rayonnante, II, 9, 37 ; intensité suivant la distance, 103 ; suivant l'obliquité, 105, 106 (voy. Rayonnement de la chaleur et Thermocbrose).
C. (sources de), II, 451 (voy. Sources de chaleur).
— est une source d'électricité, III, 362 (v. Thermo-électricité et Pyro-élec.).
Chalumeau, II, 476 ; à oxygène et hydrogène, 477 ; aèrhydrique, 478.
Chambre barométrique, I, 277 ; — de Saussure, II, 161.
C. claire, IV, 121 ; application au microscope, 362 ; — noire simple, 18 ; composée, 142.
Chameaux flotteurs, I, 163.
Champ d'une lentille, IV, 141 ; des lunettes, 367, 375 ; du microscope, 354 ; du miroir plan, 47 ; de la vision, 305.
C. de glace, II, 585.
Chamzin, II, 612.
Changements d'état des corps, I, 283 (v. Fusion, Solidification, Évaporation).
Charbon, conductibilité pour la chaleur ; I, 134, 144 ; pour l'électricité, III, 97. — fusion dans l'arc voltaïque, III, 437.
Charbons pour électrodes, III, 441, 850.
Charge par cascade des batteries, III, 164.
C. dynamique d'un circuit, 550.
Chariot électrique, III, 212.
Chaudières à vapeur, calcul de leur résistance, I, 421 ; description, II, 416 ; à haute pression, 418 ; alimentation, 419 ; appareils de sûreté, 421 ; causes d'explosion, 425.
— des bateaux à vapeur, 434 ; tubulaires, 435 ; des locomotives, 438, 442.
Chauffage par les cheminées, II, 239, 148 v. Calorifères).
Chemin de fer, atmosphérique, I, 321 ; aérien, 74.
— application de la télégraphie électrique à la sécurité, III, 831.
Cheminées (tirage des), II, 239 ; du Nord, 148.
Chercheur, des télescopes, IV, 368.
Chimie, définition, I, 3, 4 ; application des pouvoirs rotatoires à la chimie, IV, 635.
Chirurgie, applications de l'électricité, III, 412.
Choc des corps, I, 436, 438 ; direct des corps mous, 439 ; des corps élastiques, 440 ; dans une série de billes, 443, 465 ; — oblique, 444.
C. d'une veine liquide contre un plan, I, 251 ; de deux veines opposées, 258.
C. latéral ou en retour, III, 173 ; par la foudre, 223.
Chronomètres, I, 27 ; — manière de les compenser, II, 181 ; influence du fer des navires sur leur marche, III, 58.
Chromatique (χρῶμα, couleur), IV, 176 ; couleurs de la lumière, 177 ; des corps, 215 (v. Couleur, Dispersion).
Chromatisme de l'œil, IV, 307.
Chromatrope (χρῶμα, couleur ; τρέπω, tourner), IV, 226.
Chronographe (χρόνος, temps ; γράφω, écrire) électro-magnétique pour la vitesse des projectiles, III, 838.

Chute *des corps*, leis, I, 84 (*v.* Pesanteur).
Circuit *galvanique* ou *voltaïque*, III, 310.
Cirrus. II, 637, 647.
Claque-bois, I, 580.
Clarté des lunettes astronem., IV, 371.
Climat (χλῖμαξ, *degré*), II, 540 ; classificatinn des climats, 559 ; causes qui les modifient, 560 ; climats locaux, 561.
Climatologie, II, 540.
Clivage (Klœben, *fendre*), des cristaux, I, 394 ; produit de l'électricité, III, 293.
Cloches, I, 594 ; danger de les sonner en temps d'orage, III, 230.
Coefficient (rum, avec ; *efficere*, faire) de conductibilité pour la chaleur, II, 137 ; de dilatatinn, 167 ; *d'élasticité*, I, 401 ; de dispersinn, IV, 255.
Coercitive (*ferce*), III, 16 ; circonstances qui la modifient, 44.
Coexistence *des petites oscillations*, I, 464 ; IV, 385.
Cœurs *agités* de Wheatstone, IV, 308.
Cohésion, I, 135, 136 ; dans les gaz, 307 ; influence sur l'ébullitien, II, 346.
Colonnes qui accompagnent les halos, IV, 289 ; explicatien, 297.
Coloration des métaux, par dépôt de peroxyde de plomb, III, 506.
Colorigrade (*color*, *gradus*, degré), IV, 563.
Combinaisons *rhimiques*, — variatien de velume, I, 184 ; — sources de chaleur, II, 467 ; mesure de la chaleur dégagée, 478 ; cas des combinaisons par veie humide, 495.
— dégagent de l'électricité, III, 316 ; cas des corps dissons, 320.
Combustible, quantité de chaleur produite, II, 502.
Combnstion, source de chaleur, II, 467 ; source d'électricité, III, 317.
Comma (κόμμα, *m. signif.*), I, 504.
Commotion *électrique*, III, 160, 171 ; *voltaïque*, influence du sens du cenrant, 403 ; — des machines magnéto-électriques, 678 ; des mach. électro-voltaïques, 719.
Commnnication *du mouvement* entre deux corps, I, 436 ; — des meuvements vibratoires, 624 ; d'un solide à nn liquide, 629 ; entre deux pendules veisins, 626.
Commutateurs *électro-dynamiques* (*commutare*, changer), III, 628.
Comparatenr, I, 19 ; — des vibratiens, 520.
Comparaison des thermnmètres, entre eux, II, 25, 224 ; au thermemètre à air, 226.
C. des systèmes des endulatinns et de l'émissinn, IV, 414 ; expér. qui décident entre les deux systèmes, 417.
C. des sons, I, 500 ; méthode eptique, 517.
Compas des variatiens, III, 62 (*v.* Boussole).
Compensateurs, pendules, II, 178 ; des chrnnnmètres, 790.
C. *magnétique*, III, 57.
C. *optique*, IV, 403, 597.
Complémentaires, cnuleurs, IV, 213.
Composition des vitesses, I, 51 ; des forces, 58.
— des vibratinns soneres, I, 518.
— des cnurants, III, 636.
C. des couleurs, IV, 184, 219 ; construction de Newten, 221 ; fermule, 222.
Compressibilité des corps, I, 39 ; — des liquides, 263, 561 ; au moyen du son, 561 ; au mnyen de l'indice de réfractinn, IV, 406.
— des gaz, I, 297 ; lei, 264.
Compression, diminutinn qu'elle produit dans la capacité des vases, I, 268.
— dégage de la chaleur dans les solides, dans les liqnides, II, 458, IV, 406 ; dans les gaz, 459 ; sa mesure, I, 537, II, 462.
— communique la deuble réfractinn aux corps transparents, IV, 471 ; modifie celle des cristaux, 487 ; produit des conleurs dans la lumière polarisée, 566 ; — modifie la conductibilité des corps, II, 153 ; le pouvnir rntatoire magnétique des corps 652.
Compteurs électro-chronométriques, III, 825.
Concamération des tuyaux sonnres, I, 530.

Condensateur *électrique*, III, 152; manière de le charger, 154; force condensante, 155; — décharge, par contacts successifs, 158; instantanée, 159; l'électricité est sur la lame isolante, 161, 163; effets de la décharge, 171 (v. Décharge).
— *d'Æpinus*, III, 154; de Volta, 168; application aux électromètres, 167.
C. *voltaïque*, III, 717.
Condenseur de Watt, II, 394.
Conducteurs bons ou mauvais de la chaleur, II, 133, 134; — de l'électricité, III, 97.
C. *secondaire* des mach. électr., III, 118.
Conductibilité des corps pour la chaleur, II, 132; loi dans un mur, 136; dans une barre, etc., 140.
— *comparée des solides*, II, 133; des cristaux, 151; du fer, modifiée pendant l'action du magnétisme, III, 621.
— *des liquides*, II, 154; des *gaz*, 158 (v. Gaz).
C. *électrique*, III, 178; comparaison des cond. des métaux, 181.
— des corps isolants, 195; superficielle des cristaux, 199.
— des fils métalliques pour l'*électricité dynamique*, III, 533; mesure, 554, 557 (v. Lois de Ohm).
— des corps non métalliques, 561; propre des liquides, III, 482, 562, 672; des dissolutions salines, 565; influence de la chaleur, 566.
— des flammes, des gaz chauds, 569.
Cône *double* sur un plan incliné, I, 84.
Congélation, II, 286 (v. Solidification).
— de l'eau dans le vide, II, 323; par les mélanges frigorifiques, 302.
Congélateur, II, 304.
Constantes des piles, III, 554.
Contact, source d'électricité; expér. et théorie de Volta, III, 292; objections, 358; contact des liquides avec les métaux, 360.
Contraction *de la veine liquide*, I, 225; de la veine gazeuse, 348.
Contraste simultané des couleurs, IV, 348.
Cor d'harmonie, I, 551.
Cordes *vibrantes*, lois, I, 564; influence de la rigidité, 567; nœuds, 569; résonnance multiple, 571; — instruments à cordes, 572; — vibrations longitudinales, 601.
C. effets de l'humidité, II, 613, 614, 615.
C. *de Véra*, I, 194.
Cornet *acoustique*, I, 638.
— *d'harmonie* des tuyaux à hanche, I, 549.
Corps, I, 1, 35; trois états, 36; relation entre les forces moléculaires, 135.
C. plongés, équilibre, I, 157; — flottants, 161; par capillarité sur un liquide moins dense, 211.
C. solides, structure, I, 389.
Corrections successives (méthode des) I, 30.
Corrélation des phén. météorologiques, II, 656; des phén. calorifiques et lumineux, III, 71.
Côtes, influence sur la température de la mer, II, 584.
Couche de température invariable, II, 580.
Couleurs du spectre, IV, 177; théorie de Newton, 179; recomposition de la lumière blanche, 184; théor. de M. Brewster, 208.
C. *accidentelles*, IV, 344; théorie, 346.
C. simples, composées, complémentaires, 213; des corps, 215, 412, 456; — analyse au moyen du prisme, 218; des flammes, 219; — des métaux, 604; — résultat du mélange, 219; construction de Newton, 221; formule de Biot, 222.
— (nomenclature des) *tons et nuances*, IV, 223; reproduc. par la photographie, 241.
C. bleue de l'atmosphère, IV, 272.
C. dans les lames minces, IV, 451; dans les lames épaisses, 463 (v. Anneaux colorés).
Couleurs de la lumière *polarisée*, IV, 551; dans les corps rendus hétérogènes, 564 (v. Polarisation chromatique).
— du quartz perpendiculaire à l'axe, IV, 619 (v. Polarisation rotatoire).
Couple, système de forces, I, 61.
Couples de la pile, III, 302 (v. Pile); évaluation de leur force électromotrice, méthodes, III, 572; résultats, 576; unité

de force électromotrice, 581 ; calcul du courant produit, 581.

Courants de la mer, II, 583.

Courants *électriques*, propriétés, III, 310 ; identité dans tout le circuit, 315, 511 ; dans la section du réophore, 512 ; état de l'électricité, 514 ; état variable en commençant et en finissant, 551 ; — mesure de l'intensité, 524 (*v.* Réomètre).

— résistance des fils aux courants, lois de Ohm et Pouillet, III, 533, 536 ; formule, 537 ; formule des piles, 538 ; application aux réomètres, 540, vérifications, 543.

C. *astatiques*, III, 650.

C. *dérivés*, formules, III, 541 ; vérifications expérimentales, 543.

C. *hydro-électriques*, *galvaniques* ou *voltaïques*, III, 310 ; sens du courant et divers effets, 311.

— effets *physiologiques* ; animaux morts, III, 396 ; lois de la contraction, 398 ; alternatives voltaïques ; influence du sens du c., 399 ; — animaux vivants, sensation par les faibles courants, 402 ; commotion voltaïque, influence du sens, 403 ; courant continu, 405.

— action sur les végétaux, 409 ; sur la germination, 410.

— actions calorifiques sur les fils métalliques, III, 411 ; influence de la résistance, 412 ; échauffement ou *froid* aux soudures, 414, 415 ; lois de l'échauffement des fils, 417 ; influence du milieu, 420 ; échauffement des liquides, 423 ; origine de la chaleur chimique, III, 425 ; relation avec la force électromotrice, 590 (*v.* Arc voltaïque).

— actions mécaniques sur les métaux, III, 443 ; sons dans les fils métalliques, 626, 627 ; transport de liquides, lois, 444.

— actions chimiques, III, 311, 445 (*v.* Électro-chimie).

— actions magnétiques, III, 313, 596 (*v.* Électro-magnétisme).

— actions mutuelles des courants, III, 631 (*v.* Électrodynamique).

C. *induits*, par les courants, III, 670 ; par les aimants, 671 ; comparaison par leurs effets, 686 ; égalité du direct et de l'inverse, 686 ; influence de l'intensité magnétique, de la longueur du courant inducteur, 689 ; de la résistance du circuit induit, 690 ; des lames interposées, 693.

— explication des cour. induits, III, 697.

— de différents ordres, III, 699 ; par la décharge 702 ; sens déterminé par la polarisation des électrodes, 705 ; — influence des métaux rapprochés, sur la décharge induite, 707 ; sur les effets physiologiques, 708 ; sur les autres effets, 710 (*v.* Extra-courant).

C. *musculaire*, III, 390 ; lois, 391 ; origine, 392 ; produit par la contraction du bras, 392 ; propre de la grenouille, 388.

— des végétaux, III, 394.

C. *terrestre*, III, 651 ; son origine, 654 ; expl. par le magnétisme de rotation, 753.

C. *thermo-électriques*, III, 367 (*v.* Thermo-électricité).

Courbe pour représenter les lois des phénomènes, I, 8 ; c. moléculaires, 142.

— réfractoire, IV, 111 ; crépusculaire, 275.

C. *isochromatiques* de la lumière polarisée, dans les cristaux, IV, 568, 574.

Couronnes de l'aurore boréale, III, 275.

C. autour du soleil ou de la lune, IV, 446 ; explication, 449 ; — antisolaires, 450.

Crépuscule, IV, 273 ; — courbe crépusculaire, 274 ; rayons crépusculaires, 275 ; pronostics qu'il fournit, 276.

Crève-vessie, I, 293.

Cristal *de roche*, sa propriété rotatoire, IV, 613 ; pour la chaleur, 658.

Cristallisation par voie sèche, I, 389, 390 ; par voie humide, 390.

Cristallin (κρύσταλλος, *glace*) de l'œil, IV, 301 ; rôle dans l'ajustement de l'œil, 313.

Cristallographie, I, 390 ; loi de symétrie, 391 ; théorie de M. Delafosse, 393.

— application de la polarisation chromatique, IV, 583 ; isomorphisme, 584.

Cristaux (κρύσταλλος, *glace*), division en six systèmes, I, 395; *hémiédrie*, 391; IV, 639; — élasticité, I, 618. *Conductibilité* pour la chaleur, II, 151; superficielle pour l'électricité, III, 199; *pyro-électricité*, 999; — dilatation, II 177.
C. à un axe optique, IV, 469; section principale, axe, 472, 543; — positifs ou attractifs, négatifs ou répulsifs, 473; manière de les distinguer, 474, 575.
C. à deux axes, IV, 484; détermination des axes et mesure de leur angle, 576; définition exacte des axes, 551.
C. bi-réfringents, structure, IV, 471, 487; manière de distinguer ceux qui sont à un axe de ceux qui sont à deux axes, 474, 575.
Croûte du globe, formation, II, 527.
Cuvette de jauge, I, 230.
Cyanomètre (κύανος, *bleu*; μέτρον), IV, 272, 563.
Cycloïde (κύκλος, *cercle*), I, 93.
Cylindre *électrodynamique*, III, 659 (v. Solénoïde).
C. remontant un plan incliné, I, 84.
Cymbales, I, 594.

D

Daguerréotype, (Daguerre, τύπος, *empreinte*), IV, 235; panoramique, 236 (v. Photographie).
Daltonisme, IV, 344.
Danse *électrique*, III, 109.
Décharge *électrique*, du *condensateur* par contacts successifs, III, 158; instantanée, 159.
— résistance de l'air et des gaz à la décharge, III, 192.
— effets *physiologiques*, III, 171; *physiques*, inflammations, 173; fusion des fils métalliques, 176; leur résistance, 178, 181; loi de leur échauffement, 179.
— effets *mécaniques*, 182; *chimiques*, 186; *magnétiques*, 188; — produit la phosphorescence, IV, 12.
Décharge *induite*, III, 702 (v. Courants induits).
Déchargeurs des télégraphes électriques, III, 826.
Déclinaison de l'aiguille aim., III, 18; manière de la mesurer, 59; valeur aux différents points du globe, 65; lignes sans déclinaison, 66; *méridiens* magnétiques vrais et *parallèles* magnétiques, 67;
— *variations* séculaires, 80; annuelles, diurnes, 81; en différents pays, 82; *perturbations*, influence des aurores boréales, 86.
Déclinomètre, III, 77.
Décomposition des forces, I, 59, 61, 62; des vitesses, 52.
D. *de la chaleur* par réfraction, II, 65.
— *de l'électricité* par influence, III, 103.
— *de la lumière* par réfraction, IV, 179; par absorption, 204, 411; par réflexion diffuse, 213, 215; par interférences, 391; par diffraction, 424; par les lames minces, 453; par double réfraction, 559; par l'atmosphère, 269.
D. *chimiques*, sources de chaleur, II, 492; d'électricité, III, 323.
D. des composés, par la pile, III, 446 (v. Électro-chimie).
Déflagrateur, III, 306.
Degrés du méridien, augmentent vers le pôle, I, 112; — de température, II, 17.
Déliquescence, II, 613.
Densité des corps, I, 117; — de la terre, 127 (v. Poids spécifique).
— maximum, de l'eau, II, 201; des dissolutions salines, 206.
— des gaz, II, 229; des vapeurs, 379.
D. *électrique* des batteries, III, 180; influence sur la distance explosive, 193.
Densimètre, I, 181.
Dépense (hydrodynamique), I, 224; circonstances qui la modifient, 225.
Déperdition *de l'électricité* par l'air, III, 189.
— par les supports, III, 195; pénétration de l'él. dans les corps isolants, 196; quantité enlevée par une lame isolante, 197.
Détente de la vapeur dans les machines,

II, 405 ; variable, 407 ; travail produit, 409.

Déviation du fil à plomb par les montagnes, I, 127.

D. de l'aiguille aimantée par un courant, III, 596.

D. des rayons lumineux dans un prisme, IV, 114, 117 ; *minimum*, 119.

Diacaustique, IV, 108 (*v.* CAUSTIQUE).

Diagomètre (δι-άγω, *traverser*, μέτρον), III, 310.

Diamagnétisme, III, 755 ; des divers corps qui le présentent ; circonstances qui le modifient, 756 ; des liquides, 758 ; des flammes, 759 ; des gaz, 760, 765, 771 ; influence du milieu, 762 ; *polarité*, 767 ; relation avec l'intensité du courant, 770 ; de l'explication du diamagnétisme, 770.

— des cristaux, 785 (*v.* MAGNÉTISME).

Diamètre *angulaire* ou *apparent*, IV, 15.

Diapason, I, 510 ; à *fourchette*, 581.

Diaphragme (διά, *à travers* ; φράγμα, *clôture*) des piles électro-chimiques, III, 346 ; résistance aux courants, 462, influence sur la force électro-motrice, 577.

— effets sur les apparences au foyer des lunettes, IV, 436.

Diasporamètre (διασπορά, *dispersion* ; μέτρον) de Rochon, IV, 264 ; de M. Brewster, 265.

Diathermanes (διά, *à travers* ; θέρμη, *chaleur*), corps, II, 38 ; pouvoir d., 47 ; expériences de Melloni, 48.

Dichroïsme (δίς, *deux fois* ; χρόα, *couleur*) des corps colorés, IV, 206 ; des cristaux, 579.

Diélectriques, corps, III, 205.

Dièzes et **Bémols**, I, 506.

Diffraction (*diffringere*, *séparer en rompant*), description des phén., IV, 423 ; expl. de Newton, Young, 425 ; théorie de Fresnel, 426 ; franges par le bord d'un écran, 427 ; par une fente, 430 ; par deux fentes voisines, par un écran étroit, 432.

D. par des ouvertures ou écrans dont toutes les dim. sont très petites, 434 ; apparences au foyer des lunettes, 436 ; effets des diaphragmes, 437 ; passage aux phénomènes des réseaux, 444 ; — météores qui dépendent de la diffraction, 445.

D. *de la chaleur*, IV, 654 ; des rayons chimiques, 425.

Diffusion de la chaleur par réflexion, II, 67 ; par réfraction, 70.

— de la lumière par réfl., IV, 42 ; mesure du pouvoir, 45 ; par réfraction, 98.

D. des gaz qui se mélangent, I, 353.

Digesteur de Papin, II, 336.

Dilatabilité des corps, I, 40 ; II, 11, 162.

Dilatation, II, 11 ; force développée, 163.

— *linéaire* des solides, mesure, II, 165 ; lois et résultats, 167 ; formules des dilatations, 169.

— *cubique* des solides, relation avec la dil. linéaire, 170 ; dil. des enveloppes, 171 ; mesure directe de la dil. cubique, 172.

— de la glace, 176 ; des cristaux, 177.

— du verre, II, 176 ; produit des couleurs dans la lumière polarisée, IV, 567.

D. *des liquides*, du mercure dans le verre, II, 21 ; absolue du mercure, 186 ; des autres liquides, 194 ; au-dessus du point d'ébullition, 198 ; — maximum de densité de l'eau, 201 ; des dissolutions salines, 206.

D. *des gaz*, II, 208 (*v.* GAZ).

Dimorphisme (δίς, *deux fois* ; μορφή, *forme*), I, 396.

Dioptrique (διά, *à travers* ; ὄπτομαι, *voir*), IV, 90 (*v.* RÉFRACTION).

Diorama (*dies*, *jour* ; ὅραμα, *spectacle*), cause de l'illusion, IV, 337.

Direction de la force magnétique du globe, III, 22 ; — moyenne *des vents*, II, 598.

Dispersion, spectre solaire, 177 ; théorie de Newton, 179 ; — de M. Brewster, 208.

— coefficient, angle, rapport de disp. 256 ; mesure, 257 ; explication dans le système des ondulations, 414 (*v.* DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE).

Dissolution des solides, II, 298 ; sursaturation, 300 ; influence des sels dissous sur le point d'ébullition, 348 ; — chaleur absorbée dans la dissolution et la dilution, 301.

D. des gaz dans les liquides, lois, I, 357 ; expér. de M. Bunsen, 358 ; appareil des eaux gazeuses, 361 ; échange de deux gaz à travers une cloison humide, 361.

Dissolving-views, IV, 146.

Distance, jugement dans la vision, IV, 332 ; *angulaire*, 15.

Divisibilité de la matière, I, 37.

Division d'une ligne droite en parties égales, I, 22, 24 ; des arcs de cercle, 26 ; des tubes en parties d'égale capacité, II, 19.

Dorure galvanique, III, 500 ; au trempé, 502 ; par la pile, appareils, 503 ; dépôt de divers métaux, d'oxydes, 505.

Doublage des navires, préservé par les actions électriques, III, 510.

Double-réfraction, IV, 468 ; dans les cristaux à un axe, 469 ; du verre comprimé, trempé, 471 ; — des cristaux opaques, 609.

— lois, construction d'Huyghens, 475 ; vérification expér., Malus, 477 ; interprétation théorique, 478 ; émergence du rayon extraordinaire, 480 ; passage d'un cristal dans un autre, 481.

— dans les *cristaux à deux axes* ; il n'y a pas de rayon ordinaire, IV, 484 ; sections principales, 485 ; forme de la surface de l'onde, et vitesse des rayons, 486.

— *Théorie* de Fresnel, 538 ; axe et surface d'élasticité, 539 ; surface de l'onde, 544 ; construction générale des rayons réfractés, 545 ; discussion de l'équation de la surface de l'onde, 547.

D.-R. produit la *polarisation*, IV, 527.

D.-R. de la lumière polarisée, loi de Malus ou du $\cos^2$, IV, 528 ; vérifications, 584 ; — expériences des deux rhomboèdres, 529.

D.-R. *circulaire* dans le quartz, IV, 627 ; dans l'essence de térébenthine, 628.

D.-R. *de la chaleur*, IV, 655.

Doublet de Wollaston, de Ch. Chevalier, IV, 351.

Drosomètre (δρόσος, *rosée* ; μέτρον), II, 636.

Ductilité (*ducere*, *conduire*), I, 428 ; causes qui la modifient, 431.

Dureté, I, 430 ; causes qui la modif., 431.

Dynamique (δύναμις, *force*), I, 54.

Dynamomètre, I, 53.

D. *électro-dynamique* de M. Weber, III, 60.

D. *chromatique*, IV, 589.

E

Eau, compressibilité, I, 40, 263, IV, 406 ; conductibilité pour la chaleur, II, 154 ; dilatation, max. de densité, 201 ; densités à diverses températures, 205 ; chaleur spécifique pour les hautes tempér., 252.

— chaleur latente de congélation, 305 ; de vaporisation, 369 ; congélation au-dessous de 0°, 287 ; — *indice de réfraction*, IV, 94.

— décomposition par la décharge électrique, III, 187 ; par la pile, 311, 447 ; — rôle dans l'électrolyse des sels, 480.

— *eaux gazeuses* (appareil des), I. 361.

— *de cristallisation* des sels, II, 299.

— atmosphérique, II, 613 (v. Hydrométéores).

Ébranlement *direct* des molécules, source d'électricité, division mécanique, vibrations, flexions, III, 294.

Ébullition, II, 334 ; tension de la vapeur 335 ; éb. dans le vide, 336 ; — influence des vases, 339.

— phén. dans les vases chauds, 340 ; explication, 344 ; incombustibilité des tissus vivants, 346 ; — effets de la cohésion et de l'air dissous sur l'ébul., 346 ; des sels dissous, 348.

Échelles *thermométriques*, passage d'une échelle à une autre, II, 18.

Éclairs, III, 212 ; de seconde classe, sans tonnerre, 213.

Éclairage (équivalent d'), IV, 35 ; — électrique, III, 441 ; régulateurs de la lumière électrique, 849.

Écho (ἠχος, *son*), I, 477.

Écoulement des liquides, I, 219 ; principe de Toricelli, 221 ; causes qui modifient la dépense, 225 ; constitution de la veine, 243 ; — par les ajutages, 231 ;

par les tuyaux, 233 ; — intermittent, 341 ; constant, 342, 343.
— par les tubes capillaires, 241.
E. des gaz, I, 344 ; constant, 350.
Écrouissage (*crudus, dur*), I, 434.
Écueils, manière de les distinguer en mer, IV, 523.
Effet utile des machines, I, 66.
Élasticité, I, 398, de *tension* et *compression*, 399 ; — de *flexion*, I, 409 ; — de *torsion*, 412 ; — limite, 417.
— Étude par les vibrations, I, 612 ; — des corps non homogènes, 616 ; des cristaux, 618.
— Étude par la lumière polarisée, IV, 587.
— E. *des liquides*, I, 263 ; — des gaz, 273 ; loi, 297.
Électricité (ἤλεκτρον, *ambre*), III, 5 ; *statique*, 93 ; développement par le frottement, 93, 95, 280 ; — corps conducteurs, 97 ; — des deux espèces d'électr., 98 ; actions mutuelles, 99.
— *Théorie* de Symmer, III, 101 ; de Franklin, 102 ; de Faraday, 207.
— *par influence*, III, 103 ; limite de décomposition, 105.
— *attractions* et *répulsions* électriques expliquées, III, 107, lois, 134.
— se porte à la surface des corps, III, 140, 142 ; tension, 143 ; rôle de l'air, 144 ; actions électriques dans le vide, 144 ; interprétation, 145.
— distribution à la surface des corps, plan d'épreuves, 146 ; résultats, 144.
— théorie mathématique, 149 ; pouvoir des pointes, 150.
É. *atmosphérique*, manière de l'observer, III, 263 ; électomètres de Saussure, de Peltier, 264 ; emploi du rhéomètre, 265.
— à différentes hauteurs, 267 ; variations diurnes, mensuelles, 268 ; par les temps couverts, la pluie, le brouillard, 269.
— origine, 271.
— effets sur les télégraphes électr., 825.
— *des nuages* orageux, III, 211 ; origine, 212.
E. *dissimulée* ou *latente*, III, 153 (v. Condensateur).
— E. *dynamique*, III, 315 ; effets, 396 (v. Courants, Électro-chimie).
— association avec l'él. statique dans les longs fils, III, 521 ; dans les fils submergés, 522 ; effet dans les télégraphes sous-marins, 829.
E. *physiologique*, III, 383 ; poissons électriques, 383 ; — courant de la grenouille, 388 ; courant musculaire, 388 ; loi, 391.
— *Animale*, analogie avec le fluide nerveux, 406.
— *des végétaux*, III, 394.
E. *polaire*, III, 201.
Électro-aimant, III, 607 ; force, 611 ; saturation, 612 ; armatures, 615.
— différentes formes, 616.
Électro-caustique, III, 442.
Électro-chimie, III, 445 ; décomposition des oxydes, 447 ; des acides, 448 ; des sels oxygénés, 449 ; — des mélanges, 450 ; des corps organiques, 451.
— Décomp. par l'él. de tension, 186, 452.
— Circonstances qui influent, état physique, 453 ; substances mélangées, 454 ; nature des électrodes, électrodes solubles, 455.
— Transport des éléments aux électrodes, III, 456 (v. Transport).
— Lois des décompositions él. ch. ; loi de Faraday, III, 468 ; travail chimique dans la pile, 474 ; cas où il y a plusieurs équivalents, 476 ; inégalité apparente dans la puissance des pôles, 479 ; rôle de l'eau pour les sels, 480 ; actions lentes, 507 ; application de l'électro-chimie, 493 (v. Dorure, Galvanoplastie).
Électrode (ὁδός, *chemin*), III, 302, 446 ; soluble, 455 ; liquide, 457.
Électrolytes (λύω, *délier*), III, 311, 466.
Électro-dynamique (δύναμις, *force*), III, 628 ; action des courants parallèles, 631 ; croisés, 632 ; contraires, sinueux, 635 ; conséquences, 636 (v. Rotation).
— Lois mathématiques, III, 642 ; actions de deux éléments de courants, 643, 644 ; résultats du calcul, 646 ; — expl. par les

actions ordinaires de l'électricité, 648 (v. Aimants et Terre).

Électro-magnétisme, expérience d'OErsted, III, 313, 596; lois, 597; action d'un élément de courant, 598; attraction et répulsion d'un aimant par un courant, 600.

— Théorie du magnétisme, III, 656, 662 (v. Magnétisme, Aimantation, Électro-aimant); applications, 788 à 852.

Électromètres, III, 110; comparables, 112; de Henley ou à cadran, 114; des *sinus*, 140; de Lanne, 166; de Cuthberston, 167; — à condensateur de Volta, 168; de Peltier, 169, à 3 plateaux, 169; double, 170; — de Saussure, Peltier, 264.

Électromoteurs, corps, 299.

Électrophore (φέρω, *porter*), III, 120.

Électroscopes, pendule, aiguille électrique, III, 94; à paille, balles de sureau, feuilles d'or, 110; — de Coulomb, 139; — de Bohnemberger, III, 310.

Électroteint, *galvanographie*, III, 498.

Electrotype (τύπος, *empreinte*), III, 494.

Electrotypie, III, 498.

Éléments *magnétiques*, III, 14; — de la pile, 302 (v. Couples).

Embouchure de flûte, I, 524, 550; à bocal, 550.

Émissif, pouvoir, II, 76 (v. Pouvoir).

Émission (*système de l'*), de la chaleur, II, 9; — de la lumière, IV, 8, 414; explicat. de la réflexion et de la réfraction, 415.

Endosmomètre, I, 214.

Endosmose (ἔνδον, *dedans*; ὠσμός, *mouvement*), et *exosmose*, I, 214.

Enregistreurs des indications *barométriques*, I, 369; des thermomètres, II, 546; *photographiques*, I, 370; *électro-magnétiques*, 843; du passage des étoiles, 847.

Entonnoir *magique*, I, 296.

Éolipyle (*éole*, πύλη, *porte*), II, 334.

Épaisseur, mesure, par la vis micrométrique, I, 20, 21; par le déplacement des franges d'interférence, IV, 401; par les anneaux colorés, 456; — des corpuscules, des filaments, par les couronnes, 447.

Éprouvette de la machine pneumatique, I, 316, de la m. de compression, 324.

Équateur *magnétique*, III, 19; sa forme, 70. — thermal, II, 555.

Équilibre, I, 54; des corps suspendus par un point, 80; appuyés sur un plan, 81; — stable ou instable, 81; des corps flottants, 161

É. *mobile de température*, II, 102, 107, 130.

Équivalent *calorifique*, II, 499; — d'un corps en eau, II, 243.

— *mécanique de la chaleur*, II, 504; évaluation, 507; démonstration math., 512; — théorie mécanique de la chaleur, 515.

— d'éclairage, IV, 35; d'électricité, III, 473; — optique, IV, 398.

Ériomètre (ἔριον, *duvet*; μέτρον), IV, 447.

Espace, I, 2; — *planétaire*, température, 574.

États de la matière, I, 35; forces moléculaires dans les trois états, 134.

— sphéroïdal des liquides, II, 345; — hygrométrique, 614.

Étendue, propriété de la matière, I, 35.

Étésiens (ἐτήσιος, *annuel*), vents, II, 603.

Éther, II, 5; IV, 384; action des milieux en mouvement, 407.

Éthrioscope, II, 577.

Étincelants, carreaux, tubes, III, 128.

Étincelle électrique, III, 123; expl.; bruit, 124; à travers les liquides, forme dans les gaz, 125; couleur, 127; jeux de l'étincelle, 127.

E. *d'induction*, III, 677; effets, 728, constitution, 730.

E. des *poissons électriques*, III, 385.

Étoiles (*aberration des*), IV, 221; raies du spectre des ét., 194; comparaison de leur éclat, 535; — vision des étoiles en plein jour, 271; du fond d'un puits, 221; avec les lunettes, 371.

Eudiomètre de Volta (εὔδιος, *pur;* μέτρον) III, 174.
Évaporation, II, 322 ; dans le vide, 325; dans les gaz, 328 ; froid qu'elle produit, 323; alcarasas, 325 ; — fait connaître la direction du vent, 592.
Excitateur, III, 160, 214; universel, 176.
Exfoliation, source d'électricité, III, 293.
Expansion de la glace, II, 293.
Expérience, en quoi elle consiste, I, 13 ; calcul numérique des résultats, 32 ; représentation graphique, 9.
— d'Ermann, III, 267 ; de Fresnel, d'Young, IV, 390; de Galvani, III, 296; de Marly-La-Ville, III, 210 ; d'OErsted, III, 313 ; du Puy-de-Dôme, I, 280; de Tartini, 514 ; de Trevelyan, 455, etc.
Explosion des chaudières à vapeur, causes, des moyens de les éviter, II, 425.
Extra-courant, III, 712 ; avec les courants instantanés, 713, 714 ; explication de l'extra-courant, divers effets, 715 ; effets physiologiques, 716.

F

Faisceaux *magnétiques*, III, 46; — disposition des lames donnant une très forte aimantation, 48.
Fata-morgana, IV, 106.
Fantascope (φάντασμα, *illusion*; σκοπέω, *regarder*), IV, 146, 227.
Fantasmagorie (φάντασμα, ἀγορά, *assemblée*), IV, 146.
Faux-soleils, IV, 288, 297.
Fer, est magnétique, III, 8; magnétisme spécifique, 773; influence sur les boussoles, III, 55; manière de corriger, 57; influence sur la marche des chronomètres, 58; — changement de forme et de dimension dans les hélices, III, 617; déplacements moléculaires, 620; son qui en résulte, 623.
Feu central, II, 527.
F. *Saint-Elme*, III, 227.
Feux, employés pour combattre les orages, III, 230.
F. *de phare*, IV, 151 (*v.* Phares).
Fièvre, influence sur la température du corps, II, 519.
Figures *acoustiques*, I, 585; — de Leichtemberg, III, 198; roriques, 184.
F. *de la terre*, influence sur la pesanteur, I, 111.
Fil-à-plomb, I, 78; déviation par les montagnes, I, 127.
Fils *aériens* des télégraphes, III, 822; effets de l'électricité atmosphérique, 825; sons qu'ils rendent, 627.
— *souterrains, sous-marins*, 827.
Filière (*passage à la*), I, 429.
Fiole, des quatre éléments, I, 164; philosophique, 433.
Flacon, de Klaproth, I, 171 ; de Mariotte, 342.
Flamme, II, 470; interceptée par les toiles métalliques, 471; constitution, 473; pouvoir éclairant, IV, 35 ; analyse de la couleur, 219.
— *monochromatique*, IV, 219.
Flexibilité des corps, I, 429.
Flexion (*élasticité de*), I, 409 ; — produit des couleurs dans la lumière polarisée, IV, 566.
Flottants, équilibre des corps, I, 161, condition de stabilité, *métacentre*, 162.
Flotteur de de Prony, I, 224; à niveau des chaudières à vapeur, II, 424; magnétique, 425.
Fluide, *état*, I, 36.
Fluides *impondérables*, I, 5; *magnétiques*, III, 12, 16 ; — *électriques*, 104.
Fluorescence, IV, 253.
Flûte, I, 549.
Fontaine, de compression, I, 325; de Héron, 326.
— *intermittente*, avec un siphon, 344; naturelle, 344; de *Sturmius*, 341.
Force, en général, I, 52; mesure par les dynamomètres, 53 ; par les effets, 56. Composition et décomposition, 58 ; travail des forces, 64. — *Vives* (principes des), 67.
— *centrales*, I, 68 ; *Centrifuge*, *centripète*, 68, dans les corps célestes, 74, 77.

F. *moléculaires*, I, 135; relation dans les trois états, 142.
F. *coërcitive* des aimants, III, 16, 44.
F. *condensante* électrique, III, 155.
F. *électromotrice* de contact, d'après Volta, 299.
— *électromotrice* des couples, évaluation, III, 572; résultats, 576; unité, 581; for. él. élémentaire, 582; des métaux polarisés, 583; variations, 585; — au contact de deux liquides, 588; liquides et métaux, 589; relation avec la chaleur chimique, 590; — métaux amalgamés, 591.
F. *expansive* de la glace, etc., II, 293.
Forces *magnétiques* (lois des), III, 28.
— *des aimants*, III, 34, 44.
— *magnétiques* de la terre, 25, 72.
F. *électriques* (lois des), III, 134.
F. *de poussée* des corps plongés, I, 158.
Foudre, III, 216; bifurquée, *id.*; objets les plus exposés, trajet dans les édifices, 217; effets, 218; victimes de la foudre, 223; précautions à prendre, 224; — moyens de s'en préserver, 230 (v. PARATONNERRE).
— *globulaire*, 225; — progressive, ascendante, 227.
Foyer d'un miroir, IV, 72; des miroirs sphériques à petite ouverture, cas de la chaleur, II, 43; cas de la lumière, IV, 77; déplacements relatifs des foyers conjugués, 79.
— *par réfraction*, IV, 109; cas d'une surface sphérique, 124; surfaces de séparation donnant un F. exact, 127.
Foyers *des lentilles* : foy. principal, IV, 131; déplacements relatifs des F. conjugués, 132; — foyers sur les axes secondaires, 137.
Fragilité, I, 430.
Franges irisées des corps vus à travers un prisme, IV, 187.
— d'interférence, IV, 389; trajectoire hyperbolique, 392; causes qui en limitent le nombre, 394.
— de diffraction, IV, 424; trajectoire, 428.
— entre deux plaques épaisses, IV, 467.
— *hyperboliques* dans les cristaux avec la lumière polarisée, IV, 577.
Frein *dynamométrique*, I, 65; — *magnétique*, III, 616.
Froid, ce que c'est; rayonnement apparent, II, 38; réflexion apparente, 109.
— des hautes régions de l'air, II, 562; des montagnes, 563; des espaces planétaires, 574; pôles du froid, 555.
— manière de le produire, *évaporation*, II, 323; mélanges réfrigérants, 302; expansion des gaz, 460, 464.
F. produit par un courant électrique, III, 415.
Fronde, I, 70; — musicale, 454.
Frottement, produit l'électricité, III, 93, 280; — des métaux, 281; lois relatives au dégagement de l'électricité, 284.
— par un jet de vapeur, III, 287; par les gaz, 289; — objections au frottement comme source d'électricité, 289.
F. produit de la chaleur, II, 452; circonstances qui influent, 454; frottement des fluides, 455; application au chauffage, 456.
Fulgurites, III, 219.
Fumage des montagnes, II, 563.
Fusil *à vent*, I, 327.
Fusion des solides, II, 283; vitrée, 285. Changement du point de fusion avec la pression, 290.
— des métaux par la décharge électrique, III, 176; par les courants, 441; des corps réfractaires dans l'arc voltaïque, 436.

G

Galactomètre (γάλα, *lait*; μέτρον). I, 179.
Galvanisation, *des métaux*, III, 500; dépôt de peroxyde de plomb, 506.
Galvanisme, III, 296; expérience de Galvani, 296; sa théorie, 298.
Galvanographie, III, 498.

Galvanomètre, III, 314, 524 (*v.* Rhéomètre).

Galvanoplastie (πλάσσω, *façonner*), III, 493; appareil, 494, 495; moules, 496; applications, 497.

Gamme (génération de la), I, 500; majeure, 502; mineure, 508; chromatique, 508.

Gaz, I, 36, 273; conditions d'équilibre, 274; manière de recueillir, 296; — loi de leur compressibilité, 297; mesure de la densité, II, 229.

— Écoulement des gaz, I, 344; vitesse, 346; dans les tuyaux de conduite, 349.

— mélange entre eux, loi, I, 353; diffusion, 353; hypothèse de Dalton, 356.

— mélange avec les liquides, 357; échange des gaz à travers une cloison humide, 361.

— Condensation par les solides, 363.

— *conductibilité calorifique*, II, 158; de l'hydrogène, 159; chambre de Saussure, 161.

— *chaleur spécifique*, II, 267; expérience de MM. Delaroche et Bérard, 267; de MM. de la Rive et Marcet, 273; de M. Regnault, 275; — des vapeurs, 279; ch. sp. à volume constant, 282, 511.

— *Liquéfaction* et *solidification*, II, 352.

— (chaleur dégagée par la compression des) I, 537; II, 458; explique l'anomalie de la vitesse du son, 468; — froid produit par l'expansion, 460; froid dans un jet de gaz, 461; solidifie l'acide carbonique, 354.

— *dilatation*, II, 208; formule des dil., 210; effets sur la pression, 211; à hautes températures, 212; exp. de M. Regnault, 215; — d. sous pression variable, 219; sous pression constante, 221; comparaison des dil. des divers gaz, 225; applications, 237.

— *poids spécifique*, II, 229; cas où le gaz attaque les métaux, 230; expériences nouvelles, 232, 233; applications à la chimie, 235.

— *indice de réfraction*, IV, 165; expér. de Biot et Arago, 167; de Dulong, 168; résultats, 171; — par le réfracteur interférentiel, 402.

— pouvoir refroidissant, II, 121, 159, et III, 421.

Gaz, *vibrations*, I, 524; dans les tuyaux, lois de Bernouilli, 526; vérifications par l'expérience, 531; — masses d'air de forme quelconque, 537; loi des volumes semblables, 540; — vibrations par communication, 543; inflexion du son dans l'air, 546; tuyaux à anche, 547.

Gazomètre, I, 350.

Gelée *blanche* ou **givre**, II, 635.

Girouette, II, 594 (*v.* Anémomètre).

Glace. densité, II, 295; chaleur spécifique, 308; chaleur latente, 305; dilatation, 176; force expansive, 293; résistance, 309; — transport et commerce, 149.

— Formation au-dessous de 0°, II, 287; dans le vide, 3°3; par le rayonnement nocturne, 576.

— des mers polaires, champs, montagnes de glace, II, 585.

Glacière, II, 149.

Glaciers, cause de leur ductilité, II, 292.

Glaçons *charriés* sur les rivières, II, 587; formation, 588.

Glissières des m. à vapeur, II, 442.

Globes *fulminants*, III, 225.

Gloire, ou *cercle d'Ulloa*, IV, 450.

Gomme laque, III, 97.

Goniomètre (γονύ, *angle*; μέτρον) de Wollaston, IV, 59; de Mitscherlich, 60; de Charles et Malus, de M. Babinet, 61; — appliqué au microscope, 360.

Goutte *d'eau*, formation, I, 244.

Gravité, I, 75 (*v.* Pesanteur).

Gravitation, I, 75, 76; historique, 132.

Gravure galvanique, III, 499; héliographique, IV, 244; dorure des planches à graver, III, 504.

Grêle, III, 246; théories diverses, 250; théorie proposée, 253; paragrêles, 256.

— *électrique*, III, 109.

Grêlons, III, 247; structure, 248.

Grenouille *galvanique*, III, 297; courant de la gr., 388; piles de gr., 390.

— *réoscopique*, III, 389.

Grésil, II, 644.

Grossissement, de la loupe, IV, 350; du microscope composé, 355, 363; de la lunette astronomique, 369; du télescope, 379; — mesure au moyen du prisme de Rochon, 484.

Gulf-stream, (courant du golfe), II, 583.

Gyroscope (γῦρος, *mouvement circulaire;* σκοπέω, *observer*), I, 109, sert à prouver la rotation de la terre, 110.

H

Halos (ἅλως, *aire, disque*), et *phénomènes concomitants*, IV, 288; origine, 289; théorie, 291; arcs tangents, 293;

H. circonscrits, 294; — reproduction artificielle, 295; — la lumière des halos est polarisée par réfraction, 523.

Harmattan, vent, II, 612.

Harmonica, I, 594; chimique, thermique, 455; de Saint-Domingue, 580.

Harmoniques, sons, I, 508.

Hauts-fonds, influence sur la température de la mer, II, 584.

Hauteur *de l'atmosphère*, I, 366; déduite du crépuscule, IV, 275.

H. *du son*, ou *ton*, I, 490.

Hauteurs, mesurées par le baromètre, I, 376, par l'ébullition II, 337; — au moyen de l'ombre, IV, 18; d'un miroir, 48.

Hélice, *dextrorsum, sinistrorsum*, III, 602; magnétisante des électros, 607; — mouvements du fer dans les hélices, 617.

H., propulseur des navires à vapeur, II, 433.

Héliographie (ἥλιος, *soleil;* γράφω, *dessiner*), IV, 232 (*v.* Photographie).

Hélioplastie, IV, 243.

Héliostat (ἥλιος, *soleil;* στάω, *s'arrêter*), IV, 63; de Farenheit, 64; de Sgravesande et Charles, 65; de Gambey, 68; de M. Silbermann, 70.

Héliothermomètre, II, 532.

Hémiédrie, I, 391.

Hémiopsie (ἡμι, *demi;* ὄπσις, *vue*), IV, 231.

Hémisphères *de Magdebourg*, I, 294.

Horloges réglées par le pendule, I, 101.

H. *électriques*, III, 832; compteurs électro-chronométriques, 835; régulateur des horloges, 839.

H. *magnétiques*, III, 8.

H. *polaires*, IV, 507.

Horoptre, (ὅρος, borne; ὄπτομαι), IV, 230.

Houppes d'Haidinger, IV, 582.

Hydraulique (ὕδορ, *eau;* αὐλός, *tuyau*), I, 219.

Hydrocérame (ὕδορ, κέραμος, *argile*), II, 325.

Hydroclymax (ὕδορ, κλίμαξ, *degré*), I, 298.

Hydrodynamique (ὕδορ, δυναμις, *force*), I, 54, 219; — des gaz, 344.

Hydrométéores, II, 613 (*v.* Rosée, Pluie, Neige, Brouillard).

Hydrostatique, I, 54; des liquides, 144, 148; corps plongés, 157; — des gaz, I, 274.

Hygromètres (ὑγρός, *humide;* μέτρον), chimique, II, 616; à cheveu, 617; tables hygrométriques, 619; — à condensation, de Daniel, etc., 623; de M. Regnault, 625; d'évaporation, *psychromètre*, 626.

Hygrométrie, effets de l'humidité de l'air, II, 613; *état hygrométrique*, 614; méthodes hygrométriques, 616; — résultats, variations diurnes, 630; mensuelles, influence de l'altitude, 631.

Hygroscopes, II, 615.

Hypsomètre, II, 338.

I

Illumination (formule d'), IV, 28.

Images formées par les petites ouvertures, IV, 18; vues dans les miroirs plans, 47; entre deux miroirs parallèles, 52; formant un angle, 53; dans les miroirs de glace étamée, 113; — formées au foyer des miroirs sphériques, 82; vues dans les m. sphériques, 83; dans les m. cylindriques, 88; coniques, 89.

— focales des lentilles converg., IV, 138.
— formées dans l'œil, IV, 302, 304.
— de M. Moser, IV, 245.
Impénétrabilité de la matière, I, 35.
Inclinaison *de l'aiguille aimantée*, III, 18; dans les divers azimuts, 23; en différents lieux, 69; détermination par les oscillations, 69; donne la latitude en certaines régions, 72; relation avec la latitude, 71, 89.
Incombustibilité momentanée des tissus vivants, II, 346.
Indicateur de Watt, II, 410; —à niveau, 424; magnétique, 425.
Indice de réfraction, IV, 94; ce que c'est dans le système des ondes, 398, 399; dans celui de l'émission, 416.
— relatif, 94, 112, 399.
— *mesure*, pour les *solides*; méthode de Newton, IV, 155; cas d'une plaque, 158; — des liquides, 159; méthode par la réflexion dans la veine liquide, 286; par la réflexion totale, 160; procédé de Malus, 161; cas des corps opaques, 162; résultats, 163.
— des gaz. IV, 165 (*v.* GAZ); de la vapeur d'eau, 172, 404; des vapeurs à température élevée, 173.
— *mesure* par le microscope, IV, 364.
— *mesure* par les interférences, IV, 400; de l'eau comprimée, 405; par les couleurs des lames minces, 461; par l'angle de polarisation, 503; par le déplacement du plan de polarisation dans la réflexion, 515.
Inducteur *différentiel*, III, 708.
Inductif, *pouvoir*, III, 204, 205.
Induction par les courants, III, 670; par les aimants, 671; influence du fer, 672; — par la terre, 673; par un circuit très long, 694; par les courants instantanés, 699; par la décharge, 702; énoncé général, 674; formule de la force d'induction, 691; théorie, 697 (*v.* COURANTS INDUITS).
I. *réfléchie*, III, 744 (*v.* EXTRA-COURANT).
I. Dans les corps en mouvement, III, 739; produit de la chaleur, 751 (*v.* MAGNÉTISME PAR MOUVEMENT).
I. *électro-statique*, III, 104; effets dans la décharge, 182; effets des corps diélectriques, 204.
Inductionomètre *différentiel*, III, 205.
Induration, produit des couleurs dans la lumière polarisée, IV, 566.
Inertie de la matière, I, 44.
Injecteur Giffart, II, 420.
Insectes, produisent de la chaleur, II, 34, 520.
Insolation, II, 530; produit la phosphorescence, IV, 249, 250.
Instruments de musique, 523; à cordes, 572; à vent, 549; à verges élastiques, 580; à membranes, 598.
Interférences de la lumière, IV, 388; expériences, 389, 391; avec de grandes différences de marche, 394; déplacement des franges, 399; — de la chaleur, IV, 654; du son, I, 480.
Interrupteur des courants, III, 719; à mercure, 725.
Intervalles *musicaux*, I, 501.
Irradiation, IV, 222.
Isolants, corps, III, 97.
Isochronisme du pendule, I, 96.
Isomorphisme, étude par la lumière polarisée, IV, 585.

J

Jarre *électrique*, III, 164.
Jets-d'eau, I, 235; dans le vide, 326; dans un siphon, 339.
Jeux de l'orgue, I, 555.

K

Kaléidoscope (καλός, *beau*; εἶδος, *image*; σκοπέω, *regarder*), IV, 56.
Kaléidophone, I, 614 (*v.* CALÉIDOPHONE).
Kruomètre (κρύος, *glace*; μέτρον), II, 559.

L

La du diapason normal, I, 510.
Lacs, température, II, 586; du fond, II, 207.

Laminoir (passage au), I, 428.
Lames *minces* (couleurs dans les), IV, 451 (*v.* Anneaux colorés).
Lampe *d'émailleur*, II, 476; *monochromatique*, IV, 219; *photo-électrique*, 450; sans flamme, II, 473; de sûreté, 472.
Lanterne *magique*, IV, 145.
Larmes *bataviques*, I, 433.
Larynx, description, I, 639.
Lentille, IV, 128; formule, 130, 137; foyers, 131; détermination du foyer principal, 131; — cas de deux lentilles, 133; cas du point lumineux hors de l'axe, 135, 137; images focales, 138 (*v.* Acanomatisme).
— *aplanétique*, IV, 141; périscopiques, 347, 351.
— *à échelons*, ou *polyzonales*, II, 55; application aux phares, IV, 151.
Lentiprisme, ou *prisme ménisque*, IV, 144.
Levier (théorie du), I, 118.
L. *pneumatique* des orgues, I, 555.
Lignes *isobarométriques*, I, 373; — *isothermes*, II, 554; *isochimènes*, *isothères*, 557.
— sans déclinaison, III, 67; *isogoniques*, 66; isoclines, 71; isodynamiques, 73.
L. *nodales*, I, 449, 583 (*v.* Nodales).
Liquéfaction des solides, II, 283 (*v.* Fusion); par dissolution, 298.
— des gaz et des vapeurs, II, 352.
Liquides, I, 36; *cohésion*, 137; exp. de M. Plateau, 139 et IV, 452; hydrostatique des liq., 144; superposés, 164; — écoulement, 219; principe de Toricelli, 221; par les ajutages, 231 (*v.* Veine).
— compressibilité, I, 263, 561; vibrations, 557.
— *conductibilité* calorifique, II, 154; dilatation, 186.
Locomobiles, II, 414.
Locomotives, premiers essais, II, 436; description, 438; changement de marche, 444; puissance, 444; à grande vitesse, 445.
Logarithmes *acoustiques*, I, 513.
Lois *physiques*, I, 8; manière d'établir, 32; — de Kepler, I, 76; de Bernouilli, 526; de Brewster, IV, 501; de Dulong, II, 254; de Faraday, III, 468; de Joule, 418; de Lenz, III, 874; de Jurin, I, 187; de Mariotte, I, 298, 234; de Newton, II, 75; de Ohm, III, 536; de symétrie des cristaux, I, 391.
Longue-vue, IV, 373.
Loupe, IV, 349 (*v.* Microscope simple).
Lucimètre de Bouguer, IV, 271.
Ludion, I, 164.
Lumière, IV, 5; hypothèses sur sa nature, système des ondulations, 7, 384; de l'émission, 8, 414; sources, 9; — mode de propagation, 14; intensité, 26 (*v.* Photométrie).
L. *électrique*, III, 423; dans l'air raréfié, 434; dans divers milieux, dans le vide, 431; — raies dans le spectre, IV, 204.
L. de l'arc voltaïque, III, 439; régulateur, 849 (*v.* Arc voltaïque).
L. des courants induits, III, 732; stratification, 733.
L. *Drummond*, II, 478.
Lune-rousse, II, 577.
Lunette *astronomique*, marche des rayons, IV, 366; champ, 364; grossissement, 369, 370; mesure par le prisme de Rochon, 484; clarté, 371; historique, 376; apparence au foyer, 436.
L. *terrestre*, IV, 372; de nuit, 372; cornet, 374; Napoléon, 375; de Galilée, 375; à prismes, 376; polyalde, 373; dialytique, vitro-cristalline, 369.
L. *magique*, IV, 49.
L. de Rochon, IV, 481.
L. *magnétique*, III, 76.
Lunettes ou *bésicles*, IV, 316.
Lycopode, se porte sur les ventres de vibration, I, 583; cause, 584; forme des anneaux colorés, IV, 446.

M

Machine simple ou composée, I, 63.
— à diviser, I, 22; d'Atwood, 87; *id.* par

l'électro-magnétisme, III, 842; de M. Morin, I, 89; de Pascal, I, 153; à colonne d'eau, 155; de Schemnitz, 3 6; soufflantes, 351; à air dilaté, 241, 447. à air comprimé, 447; à gaz, 447.

Machines à vapeur, historique, II, 388; de Savery, 392; atmosphérique, 393; à double effet, 396; de Watt, 401; à haute pression, 403; Maudslay, 404; à cylindre oscillant, 405; à détente 405; — calcul du travail, 408; — à vapeurs combinées, 415; surchauffées, 416 (v. CHAUDIÈRES).

— de *compression*, I, 323; *pneumatique*, 313.

M. *électriques*, III, 112; de Ramsden, 113; de Van-Marum, 116; de Nairne, 117; hydro-électriques, 118.

— *magnéto-électriques* de Pixii, III, 675; de Saxton et Klarke, 677; effets, 678; influence de la vitesse de rotation, 680 (v. APPAREILS).

M. *d'induction* électro-voltaïques, III, 718; volta-faradique, 720; de Ruhmkorff, 722 (v. BOBINE).

M. électro-magnétiques, III, 788 (v. MOTEURS).

Magnétisme, III, 5 et 6 (v. AIMANT); influence de la chaleur, 8 et 784; théorie des deux fluides, 12; éléments magnétiques, 14; — distribution dans les aimants, 32; transversalement, 35; — théorie électro-dynamique, III, 656; — action sur la lumière électrique, 278, 434, 735.

M. *par mouvement* ou *de rotation*, III, 739; lois, 743; explication par l'induction, 744; distribution des courants dans un disque, 744, 746; — induction par mouvement dans une masse métallique, 749; produit de la chaleur, 751.

M. *polaire* des roches, III, 91.

M. *rémanant* des électro-aimants, III, 609.

M. *spécifique*, III, 773; actions mécaniques, 773; des corps diamagnétiques ou peu magnétiques, 779; lois, 782; de l'oxygène, de l'air, 783; influence de la chaleur, 784; — dans les cristaux, 785; explication, 786.

M. *terrestre*, III, 20; mesure, 25; étude, 55; hypothèses pour expliquer sa distribution, 88; — explication par les courants, III, 65.

M. (*universalité du*), III, 753, 756 (v. DIAMAGNÉTISME).

Magnétomètre *bifilaire*, III, 78; *balance*, 79; *électrique*, 531.

Malléabilité, I, 428.

Manomètre (μανός, *rare*; μέτρον), I, 308; barométrique, 316; métallique, 319; II, 422; à air libre, 423; — de Berthollet, II, 323.

Marmite *de Papin*, II, 835; *autoclave*, 336.

Marteau d'eau, I, 86; — *pilon*, ou à vapeur, II, 413.

Masse, I, 56, 57; mesure, 117; — de la terre, 127.

Matière, I, 36; des trois états, 36, 135.

Maximum *de densité* de l'eau, II, 201; des dissolutions salines, 206; — de viscosité, 257.

Médecine, appl. de l'électr. dynamique, III, 407; appl. de l'incandescence des fils, 412; déplacement de substances chimiques dans les tissus vivants, 457.

Mégascope (μέγας, *grand*; σκοπέω, *regarder*), IV, 144.

Mélange *des gaz* entre eux, I, 353; avec les liquides, 357; — des couleurs, IV, 184.

— explosif, II, 471; — *frigorifique*, 302.

Membranes, vibrations, I, 595.

Ménisque *capillaire*, I, 185; convergent, divergent, IV, 129.

Mer (phosphorescence de la), IV, 11; — température, II, 582; causes qui la modifient, 583.

Mercure, dilatation absolue, II, 186; — mouvements pendant l'électrolyse, III, 167; rotation par les aimants et courants, 665.

Méridien *terrestre*, mesure, I, 112.

M. *magnétique*, III, 18; magnétique *vrai*, 67.

Mesures *de précision*, I, 14.

Métacentre, I, 162.

Métaux, bons conducteurs de la chaleur, II, 134; de l'électricité, III, 97; altération par les courants, III, 443; — polarisent la lumière elliptiquement, IV, 599; couleur, 604.

Météores (μετέωρος, *élevé*) qui dépendent de la chaleur, II, 539; aqueux, 613, 636; électriques, III, 209; — dépendant de la réfraction de l'air, IV, 99, 269; de la dispersion, 277; de la diffraction, 445.

Météorologie (μετέωρος, λόγος, *discours*), I, 365; II, 539.

Méthode expérimentale, I, 13; de précision, 28; de répétition 29; des corrections successives, 30.

Mica, forme cristalline, explic. de l'angle variable des axes, IV, 489, 587; *quart d'onde*, 594.

Micromètre (μικρός, *petit*; μέτρον), focal, I, 17, et IV, 369; de Fresnel, 392. — à double image de Rochon, IV, 484; modification d'Arago, 483.

Microscope (μικρός, *petit*; σκοπέω, *regarder*) *simple*, IV, 349; grossissement, 350; — de Raspail, à main, stanhope, de diverses espèces, 351, 352.

M. *composé*, IV, 353; champ, 354; achromatisme, grossissement, 355; mesure, 363; description, 356; — à plusieurs corps, 360; binoculaire, de poche, 364.

M. *catadioptrique*, IV, 383.

M. *polarisant* d'Amici, IV, 583.

M. *solaire*, IV, 147; à gaz, photo-électrique, 149.

Mines, température, II, 525.

M. (*inflammation des*), III, 738.

Mirage, IV, 102; inverse, latéral, 105; déplacement, suspension, 107.

Miroirs *plans*, IV, 46; de glace étamée, 48, 113; — mouvement du rayon réfléchi, avec le miroir, déviation par deux miroirs, 50; — images dans deux miroirs parallèles, 52; inclinés, 53.

M. *courbes*, IV, 72; *sphériques*, construction de la caustique, 73; discussion, 75; — cas d'une ouverture très petite, formule, 77; — images focales, grandeur, 82; vues dans les miroirs, 83; — mesure du rayon, 84.

— *magique*, IV, 49.

M. *paraboliques*, applic. aux phares, IV, 86; *elliptiques*, *hyperboliques*, 87; *cylindriques*, 88; *coniques*, 88, 89.

M. *ardents*, II, 44; *conjugués*, 42, 44.

Mobilité, I, 43.

Mode, *majeur*, I, 502; *mineur*, 508.

Modérateur à force centrifuge, II, 402; Molinié, 403.

Moiré *métallique*, I, 398.

Molécules, I, 38; forces qui les retiennent, 135.

Moment d'une force, du levier, I, 119.

M. *magnétique d'un aimant*, III, 32.

Mongolfière, I, 383 (v. Aérostats).

Montagnes, dévient le fil à plomb, I, 127; neiges perpétuelles, II, 569.

M. *de glace*, II, 586.

Montre-thermomètre, II, 547.

Monocorde, I. 505, 570.

Mortier *électrique*, III, 125.

Moteurs *électro-magnétiques*, historique, III, 788; à rotation directe, 790; à mouvement alternatif, 792; comparaison du travail à celui des moteurs à vapeur, 795.

Moulinet dans le vide, I, 44.

— *électrique*, III, 151.

Moussons (*mousson*, en arabe, saison), vents, II, 602, 606.

Mouvement, *absolu*, *relatif*, I, 46; uniforme, 46; varié, 47; uniformément varié, 47; composé, 51, — *curviligne*, 68.

Multiplicateur, III, 313; à deux aiguilles, 314 (v. Rhéomètre).

Mur (*distr. de la température*), II, 136.

Myopie (μύω, *cligner*; ὤψ, *vue*), IV, 346, 347.

N

Nacre, cause de sa coloration, IV, 443.

Navires *naufragés* (sauvetage des), I, 163.

Neige, II, 642; rouge, 641; quantité an-

nuelle, 645; rôle préservateur, 645; — perpétuelle des montagnes, limite, 569.
Néphéloscope (νεφέλη, *nuage*; σκοπέω), II, 611.
Nerfs (action des courants sur les), III, 404.
Nimbus, II, 638; formation, 641.
Niveau à bulle d'air, I, 167; d'eau, 167.
N. constant d'un liquide, 224, 343.
Nœuds de vibrations, des cordes, I, 569; des verges droites, 576; des verges courbes, 581; des tuyaux sonores, 527, 532.
Nodales (*lignes*), I, 523; des plaques carrées, 585; des plaques polygonales, 589; circulaires, 590; elliptiques, 591; — déplacement des lignes nodales, 592.
— des membranes, I, 595.
— dans les vibrations longitudinales, caractères, I, 602; origine, 604.
Nomenclature des couleurs, IV, 223; — des nuages, II, 637; des vents, 390.
Nonius, I, 16.
Notes *de la gamme*, rapports des nombres de vibrations, I, 503.
Nuages, nomenclature, II, 637; formation, 639; suspension, 640.
— *orageux*, actions par influence, III, 226; constitution, 238; origine de l'électricité, 242; — des volcans, 242; — à grêle, 246; marche, 249.
Nuance, diffère du *ton*, IV, 223.

O

Objectif, *achromatique*, des microscopes, IV, 356; des lunettes, 368; du daguerréotype, 235.
Observation, en quoi elle diffère de l'expérience, I, 13.
Observatoire météorologique, II, 541; *magnétique*, III, 76.
Octave musicale, I, 501.
Oculaire, de Campani, IV, 355; *positif* ou de Ramsden, *négatif* ou d'Huyghens, 369.
Œuf *électrique*, III, 126.
Œil, description, IV, 300; ajustement d'après les distances, 308; sensibilité, 319; durée de l'impression, 323 (*v.* Vision). — *artificiel*, 317.
Œnomètre (οἶνος, *vin*; μέτρον), I, 179.
Ombre, et pénombre, IV, 16; sert à mesurer les hauteurs, 17.
O. *frangée*, ou *gloire*, IV, 450.
O. sonore, I, 483.
Ombromètre (ὄμβρος, *pluie*: μέτρον), II, 648.
Onde *lumineuse*; surface dans les cristaux à un axe, IV, 478; équation, 544; discussion, 547.
O. sonore, mesure de sa longueur, I, 461; surface, 465.
Ondulations *de la lumière* (système des), IV, 7, 384; principe d'Huyghens, 386; des interférences, 388; expl. de la réflexion, 396; de la réfraction, 397; de la dispersion, 411; comparaison au syst. de l'émission, 414, 417.
— Longueur (*d'*), mesure par les interférences, IV, 393; par les réseaux, 442.
Opacité, IV, 15.
Optique (ὀπτικὸς, *qui a rapport à la vue*), IV, 5; division en deux parties, 6.
Optomètre ou *opsiomètre* (ὄψις, *vue*: μέτρον), IV, 318.
Orages, formation, III, 238; périodicité, 241; répartition suivant les saisons, 243; suivant les lieux, 244; en Europe, 245.
O. *magnétiques*, III, 87.
Oreille, description, I, 631 (*v.* Ouïe).
Orgue, description, I, 552; manière d'accorder, 541; par les battements, 515.
O. *philosophique*, ou *chimique*, I, 455.
Oscillations du pendule, lois, I, 95; — (méthode des), pour les forces magnétiques, III, 28; électriques, 135.
Osmose et endosmose, I, 215.
Osselets de l'oreille, I, 632; rôle dans l'audition, 634.
Ouïe, I, 631; mécanisme de l'audition, 633, théorie de l'audition, 635; rapport du jugement avec la sensation, 637.
Ouragans, II, 610.
Ouverture d'un miroir, IV, 77; d'une

lentille, 129 ; — images formées par les petites ouv. 18.
Oxydes, décomposés par la pile, III, 447 ; dépôts galvaniques, 505 ; — formation par les actions lentes, 509 (v. Électrochimie).
Ozone (ὄζω, *sentir*) ; odeur de la décharge électrique, III, 188 ; de la foudre, 221 ; — propriétés, 487 ; de sa nature, 490 ; présence dans l'air, 492.

P

Palmique (παλμικός, relatif aux vibrations), I, 523.
Panorama (πᾶν, *tout* ; ὅραμα, *spectacle*), IV, 337.
Papier *photographique*, IV, 236 ; ciré, gélatiné, 238.
Parabole des projectiles, I, 91.
Parachute, I, 387.
Paradoxe *hydrostatique*, I, 152 ; *magnétique*, III, 13.
Parallélipipède des forces, I, 60 ; — de Fresnel, IV, 596 ; usage comme polariscope elliptique, 597.
Parallélogramme des vitesses, I, 51 ; des forces, 58 ; — de Watt, 397.
Parafoudre des télégraphes électriques, III, 826.
Paragrêle, III, 256.
Parallèles magnétiques, III, 67.
Paratonnerre, double rôle, III, 231 ; construction, 232 ; des navires, 235 ; utilité, 236.
Paranthélie, IV, 289, 296.
Parasélène, IV, 289.
Parhélie (παρά, *auprès* ; ἥλιος *soleil*), IV, 288, 292.
Parole, I, 645.
Passivité du fer, etc., III, 465 ; cause, 466.
Pavillon du cor, I, 554 ; du porte-voix, 646 ; — de l'oreille, 631 ; rôle, 635.
Pendule (*pendulus*, pendant), simple, I, 95 ; composé, 98.
— appl. aux horloges, I, 101 ; à la preuve du mouv. de la terre, 107 ; perpétuation des oscill. pour cette exp., III, 848 ; cycloïdal, I, 102 ; à seconde, 105.
P. *acoustique*, I, 451 ; — influence mutuelle de deux pendules, 626.
P. *compensateur*, II, 178.
P. *électrique*, III, 24.
Pénombre (*pene*, presque), IV, 16.
Perce-carte, III, 183.
Perce-verre, III, 183.
Perspective, linéaire, aérienne, IV, 337.
Perturbations de l'aiguille aimantée, III, 86 ; par les aurores boréales, 86, 273.
Pesanteur, I. 75 ; lois, 84 ; intensité, 103, 114 ; variations, 106, 115, 116. — de l'air, des gaz, 275.
Pèse-liqueur, etc., I, 178.
Peson à ressort, I, 53.
Phare *catoptrique*, IV, 86 ; dioptrique, 150 ; feux à éclipses, 151 ; fixes, 152 ; — éclairés par l'électricité, III, 442, 852 ; portée, 151.
Phénakisticope (φενακιστικός, *qui trompe* ; σκοπέω), IV, 226 ; stéréoscopique, 342.
Phénomène (φαινόμενος, *qui apparaît*), définition, I, 1.
Phonautographe, I, 495.
Phosphore (φῶς, *lumière* ; φέρω, *porter*), luit dans l'obscurité, IV, 10 ; de Canton, de Boulogne, de Baudouin, 13.
Phosphorescence, spontanée, IV, 10 ; de la mer, de certains animaux, 11 ; — artificielle ; par la chaleur ; par décharge électrique, 12 ; par actions mécaniques, 13 ; par insolation, 13, 249 ; considérations théoriques, IV, 413.
Phosphorogéniques (*action* des rayons lumineux), IV, 249 ; raies, 250 ; substances, 250.
Phosphoroscope, IV, 252.
Photographie (φῶς, *lumière* ; γράφω), historique, IV, 232 ; sur métal, 233 ; sur papier, 236 ; épreuves négatives, 237 ; positives, 238 ; sur verre albuminé, 230 ; au collodion, 240 ; — applications, 243 ; — chromatique, 241 ; de l'invisible, 255.

Photolitographie, IV, 245.
Photomètre (φῶς, *lumière;* μέτρον), de Bouguer, IV, 29; de Ritchie; de Rumfort, 30; de Bunsen, de Leslie, de Wheatstone, 31; électrique de Masson, 32; chimique, 243; — d'Arago, 531; de M. E. Becquerel, 536; à pile de glaces, 564; — par les lames minces, 454.
Photométrie, var. de l'intensité de la lumière avec la distance, IV, 26; cas d'un corps étendu, 27; — lumière, reçue, émise, obliquement, 27, 28; — formule d'illumination, 28; résultats, 34.
— expériences d'Arago, IV, 530.
— *électrique*, IV, 33.
Physique (φύσις, *nature*) *générale*, I, 1; classification, 2; origine, 4; — proprement dite, 3, 4; but, 8; — mathématique, 12.
Piézomètre (πιεσις, *pression;* μέτρον), I, 265.
Pile *galvanique* ou *voltaïque*, théorie de Volta, III, 300; en activité, isolée, 302.
— à colonne, à auges, 303; à couronne, de Wollaston, 304; en hélice, 305; d'Young, 306; de Muncke, d'Œrsted, de Sturgeon, 307.
— *sèche*, 308; applications, 309.
— *théorie chimique*, III, 327; inversions par le changement de liquide, 328; origine chimique de l'électricité, 330; cas de plusieurs couples, 332; — piles inactives pendant que le circuit est ouvert, 334; — polarisation des éléments, 335; — zinc distillé ou amalgamé, 336.
— travail chimique intérieur, III, 474; formule de Ohm, 538.
— causes de l'affaiblissement, 337; action de l'oxygène, 339.
Piles *à courant constant*, de Smée, III, 341; de Bagration, 342; cloisonnées, chaîne à oxygène, 342.
— de Daniell, III, 343; de Wheatstone, 346; de Grove, à tête de pipe, de Schœnbein, 347; à charbon, 348; disposition pour amorcer tous les couples à la fois, 349; modifications diverses, 351.
— *voltaïque à gaz*, 354.
— *secondaires* de Ritter, III, 353; de M. Planté, 354.
— comparaison des forces électromotrices, III, 572 (*v.* Couples).
P. *électriques*, III, 165.
— *de grenouilles*, *musculaires*, III, 390.
— *thermo-électriques*, III, 372; effets, 374.
— *de tourmalines*, III, 365.
P. *de glaces*, IV, 491, 521; transparence, 522; théorie, 525; application à la polarimétrie, 536.
Pince thermo-électrique, III, 384; — à tourmalines, IV, 569.
Pistolet *de Volta*, III, 174.
Planisphère électrique, III, 109.
Plaque *fusible*, II, 422; — de correction des boussoles, III, 57.
Plaques vibrantes, I, 583; lois, 584; — figures acoustiques, plaques carrées, 585; plaques polygonales, 589; circulaires, 590; — déplacement des nodales, 592.
Platine, action sur les mélanges explosifs, II, 473; sur l'oxygène, III, 359.
Pluie, théorie de Hutton, II, 640; de Babinet, 641; pluies singulières, 642.
— distribution, 650; quantités annuelles, influences diverses, 652; — suivant les saisons, 653; répartition des jours de pluie, 655; — négatives, 270.
P. d'animaux divers, 262.
P. de mercure (*expér. de la*), I, 37.
Pluviomètre (*pluvia*, μέτρον), II, 648.
Pneumatique (πνεῦμα, *air*), I, 273.
— machine, I, 313; à deux corps de pompe, 314; à double épuisement, 317; à double effet, 319.
Poêle, II, 102; du nord, 148.
Poids d'un corps, I, 79, 117; mesure, 121.
— d'un litre d'air, II, 231; perte d'un corps dans l'air, I, 183.
Poids *spécifique*, I, 117; mesure, 169; des corps qui ne peuvent être mouillés, 311; — des gaz, II, 229 (*v.* Gaz).
— des vapeurs, II, 379 (*v.* Vapeurs).
Pointes (*pouvoir des*), III, 150.

— *des paratonnerres*, 232.
Points *conséquents des aimants*, III, 11; manière d'en obtenir, 43, 602.
P. *neutres* de l'atmosphère, IV, 507.
Poissons *électriques*, III, 383.
Polarimètre, IV, 236; graduation, 237.
Polarisation, *des corps diélectriques*, III, 201; dans l'induction électro-statique, 204; par les vibrations, 295.
P. *des électrodes*, 322; courant qui en résulte, 461; — effet sur la force de la pile, 338; — force électromotrice développée, 583.
P. dans la pile, III, 334.
P. *rectiligne de la lumière*, IV, 489; plan de polarisation, 490; — expl., 493; — de l'atmosphère, 506.
— *par réflexion*, 498; angle de polar., 499; mesure, 500, 606; — loi de Brewster, 501; — à la seconde surface, 503; par réflexion diffuse, 504; — partielle, 505, 519.
— théorie de la polarisation par réflexion, 515, 518.
— *par réfraction simple*, IV, 519; pile de glaces, 521; — par émission oblique, 523; — théorie de la polarisation par réfraction, 525.
— *par double réfraction*, 527; expériences des deux rhomboèdres, 529.
P. *chromatique*, IV, 551, 553; — théorie, 557, 559.
— cas des rayons convergents autour de l'axe, 567; théorie, 570; — cas du quartz, 619; — cristaux à deux axes, 573; franges hyperboliques, 577.
— dans le verre trempé, comprimé, échauffé, etc, 564.
P. mobile, IV, 556.
P. *elliptique et circulaire*, IV, 589; état du rayon, 590; propriétés, 592; appl. à la lumière émergeant d'une lame bi-réfringente, 593.
— par réflexion totale, 595; par réflexion métallique, 599; différence de phase, 601; comparaison des résultats avec les formules de Cauchy, 603.
— par réflexion sur les corps non métalliques, 605; lois et résultats généraux, 607.
— par réflexion cristalline, 608.
P. *rotatoire moléculaire*, IV, 613; lois de Biot, 614; teinte sensible, 616; mesure de la déviation, 617; — anneaux du quartz, 619; manière de trouver le sens d'un cristal, 620; spirales d'Airy, 620; — pouvoir des liquides, 622.
— théorie de Fresnel, 624; — de la cause première de la polar. rotatoire, 628.
— lois, 629; pouvoir spécifique, 630; — applicat. à l'étude des dissolutions, 632; à la chimie, 635; à la saccharimétrie, 636.
— relation avec l'hémiédrie, 639.
P. *rotatoire magnétique*, IV, 643; sens de la rotation, 645; — relation avec la force magnétique, 648; cas où l'action est oblique, 651; le magnétisme agit sur les molécules pondérables, 952.
P. *de la chaleur*, IV, 655; des rayons calorifiques de l'atmosphère, 657; — rotatoire de la chaleur; rotatoire magnétique, 658.
Polariscopes *simples*, de réflexion, IV, 490; de réfraction, bi-réfringents, de Nicol, 491; tourmaline, 492.
P. *à deux images*, prisme de Wollaston, IV, 530.
P. *composés*, à lunules ou d'Arago, 492; de M. Babinet, 566; de Savart, 579; — bi-quartz de M. Soleil, 618; de M. de Sénarmont, 619.
P. circulaires et elliptiques, 594, 597, 648.
Pôles *des aimants*, III, 9, 15, 20; — magnétiques du globe, 49, 57.
— de la pile, 302; — homologues et antilogues des cristaux pyro-électriques, 363.
P. *terrestres*, température, II, 555.
Polémoscope, IV, 49.
Poli, influence sur les pouvoirs diathermane, II, 49; émissif et absorbant, 84, 93.
Polychroïsme, des corps colorés, IV, 206; des cristaux, 580.
Polyprisme, IV, 178.
Pompe aspirante, I, 330; foulante, 332;

à double effet, 334; à piston plongeur, etc., 335.
— de *compression*, I, 324.
— *électrique*, III, 117.
Ponts-tunnels, I, 426,
Porosité *de la matière*, I, 41, 264; *accidentelle*, 42.
Porte-lumière, IV, 63.
Porte-voix, I, 646.
Pouce *d'eau*, I, 230.
Poussée *des fluides*, I, 158.
Pouvoir *absorbant* ou *admissif* pour la chaleur, II, 92; égale le pouvoir émissif, 97, 119; — *émissif* ou *rayonnant*, 76; des corps en poudre fine, 83; — *réflecteur*, 84; variation avec l'incidence, 88; — *diffusif*, 90; — *diathermane*, 47.
— refroidissant des gaz, II, 121; de l'hydrogène, 159; III, 421; — *conducteur*, II, 132.
P. *calorifique des combustibles*, II, 478, 502.
P. *réflecteur* pour la lumière, IV, 44; — de diffusion, 45; des métaux, 535.
P. *dispersif*, IV, 256; *réfringent* des gaz, 165.
P. *rotatoire* des liquides, IV, 622; moléculaire, 629; appl. à l'étude des dissolutions, 632.
P. inductif, III, 201, 205; *thermo-électrique*, 370.
P. *des pointes*, III, 150.
Presbytisme (πρέσβυς, *vieillard*), IV, 315, 317.
Presse *électrique*, III, 177.
— *hydraulique*, I, 146.
Pression, des fluides, I, 145; des liquides sur le fond des vases, 149; sur les parois latérales, 152; pendant le mouvem., 238.
P. *atmosphérique*, 278; effets, 293.
P. *des gaz*, I, 295; pendant le mouvement, 345.
P. est une source d'électricité, II, 291; lois, 292.
Principe *d'Archimède*, I, 157; de Toricelli, 221; — d'Huyghens, IV, 386; des interférences, 388, d'Young, 458; de Fresnel, 509.
Prisme, II, 53; en optique, IV, 111; limites des rayons qui émergent, 115; rayons obliques aux arêtes, 116; déviation, 117; dév. *minimum*, 119; décompose la lumière, 177.
P. à angle variable, IV, 118; flacon, 159; ménisque, 144; — *achromatique*, 261.
P. redresseur des microscopes, 360.
P. de Nicol, 491; de Rochon, 481; de Wollaston, 530.
Projectiles, trajectoire, I, 91; mesure de la *vitesse*, III; 838 à 841.
Pronostics, II, 657; tirés du crépuscule, IV, 276.
Propagation de la *chaleur* à distance, I, 37; par *conductibilité*, 132.
— de l'*électricité* dans les mauvais conducteurs, III, 189, 195; pénétration dans les corps, 196; — dans les fils conducteurs, 315, 511; état variable d'un courant commençant, 551.
— de la *lumière*, IV, 14.
— du *vent*, II, 600; du son, I, 458, 463.
Pseudoscope (ψεύδω, *tromper*; σκοπέω), IV, 227; stéréoscopique, 342.
Psychromètre (ψυχρός, *frais*; μέτρον), II, 626; exactitude, 628.
Puissance réfractive, IV, 165; dans le syst. des ondes, 400; de l'émission, 416.
Puits *artésiens*, I, 236; température, II, 526; — de glace, 207.
Punctum cœcum de l'œil, IV, 221.
Pupille, IV, 300; rôle dans la vision, 312.
Pyrhéliomètre simple, II, 533; à lentille, 534.
Pyro-bélier, II, 506.
Pyro-électricité *des cristaux*, III, 362; lois, 365; — différentes substances qui la possèdent, 366.
Pyromètre (πῦρ, *feu*; μέτρον), de Sgravesande, I, 40; à cadran, II, 11; de Régnier, 183; de Brongniard, 184; de Wedgwood, 184; — à air, 214, 226; à capacité constante, 250; magnétique, III, 380.

Q

Quantité de chalour, II, 241 (*v.* Chaleur spécifique).

Q. *d'électricité* de la pile ; comparaison aux effots chimiques et magnétiques; III, 592 ; à une chargo électrostatique, 593.

Q. *de mouvement*, d'uno force, I, 57.

Quart *d'onde*, lame, IV, 594.

Quartz *croisés*, IV, 578 ; de rotation inverse, 620 (*v.* Cristal de roche).

Quinine *sulfatée*, manière d'en reconnaître la pureté, IV, 635.

Quinte musicale, I, 501.

R

Radiations *calorifiques*, II, 72 et IV, 248; *chimiques*, IV, 224; *lumineuses*, 247 ; *phosphorogéniques*, 249 ; no sont pas distinctes, 250..

Raies *du spectre*, IV, 191 ; mode d'observation, 192 ; font distinguer les sources de lumière, 194.

— brillantes dos *flammes*, IV, 196 ; gaz interposés, 194 , appl. aux analyses chimiques, 198.

— do la lumière *électrique*, IV, 201 ; influence des électrodes ; du milieu, 202.

— *du spectre chimique*, IV, 227; du *spectre phosphorogénique*, 250.

R. vues dans uno fente étroite, IV, 222.

Rapport *de dispersion*, IV, 255.

Rayons de chaleur, II, 39.

— lumineux, IV, 14; marchant en ligne courbe par réflexion continue, 57 ; — *réfléchis*, construction, 47 ; *réfractés*, construction, 97 ; *colorés simples*, IV, 183.— Effets chimiques, 225 ; rayons continuateurs, 227 ; identité des rayons chimiques et lumineux, 231. —Propriétés *éclairantes*, 247 ; *calorifiques*, 248 et II, 71. — Effets *phosphorogéniques* , IV , 249 (*v.* Phosphorogénique).

R. *Sonores*, I, 465.

R. do l'*aurore boréale*, III, 275; — *crépusculaires*, IV, 275.

R. efficaces, de l'arc-en-ciel, 279 ; — des halos, 291.

R. do courburo des miroirs sphériques , IV, 81.

R. ordinaire et extraord. dans la donble réfraction, IV, 469.

Rayonnance, dans l'œil, IV, 223.

Rayonnement de la chaleur, II, 37; dans le vide, 38 ; — apparent du froid, 38 ; particulaire, 82.

R. *nocturne*, effets , II, 575 ; causes qui le modifient, 576.

Réaction, égalo à l'action, I, 67 ;

R. des liquides en mouvement, I, 219 ; des gaz en mouv., 344 ; do la vapeur, II, 389.

R. électrodynamiqno des plis d'une hélice, III, 712 (*v.* Extra-courant).

Réchauffement, II, 129 (*v.* Refroidissement).

Recul des armes à feu. I, 344.

Réélectromètre, III, 623.

Réflecteur, *pouvoir* ponr la *chaleur*, II, 84; — pour la *lumière*, IV, 44 ; du *verre* sous diverses incidences, IV, 532 ; des *métaux*, mosure, 535, 600.

Reflet, IV, 43.

Réflexion *de la choleur*, II, 40 ; lois, 41; diffuse, 67; — apparente du froid, 109.

R. *de la lumière*, lois, IV, 40 (*v.* Miroirs).
— Expl. dans le syst. des ondes, 396 ; de l'émission, 415.

— *diffuse*, fait voir les corps, IV, 42.

R. *totole*, IV, 95 ; il n'y a pas de perte, 534; . expl. dans le systèmo des ondes, 396 ; de l'émission, 417 ; — produit la polarisation elliptique, 595.

R. *de la lumière polarisée*, IV, 508 ; principes do Fresnol, 509 ; formules, 510 ; changement du plan de pol., 509, 514.

R. *du son*, I, 473 ; lois, 476.

Réfracteur *interférentiel*, IV. 401.

Réfraction (*refringere*, *briser*), *de la chaleur*, II, 53 ; diff. réfrangibilité des rayons, 64.

R. *de la lumière*, IV, 90 ; lois, 92 ; cons-

truction du rayon réfracté, 97 ; — expl. dans le système des ondes, 397 ; de l'émission, 415.
R. *atmosphérique*, *astronomique*, *terrestre*, IV, 99 ; tables de réfraction, 100.
R. par une surface plane, IV. 108, 111 (v. PRISME) ; — par une surface sphérique, 123 ; — image des objets intérieurs, 126; — surface donnant un foyer exact, 127 (v. LENTILLES).
R. de la lumière polarisée, IV, 524 ; changement du plan de polarisation, 525.
R. *double*, IV, 468 (v. DOUBLE RÉFRACTION).
R. *conique* intérieure, IV, 548 ; à l'émergence 5,49.
R. *du son*, I, 483.
Réfrangibilité inégale des rayons colorés, IV, 181 ; des rayons de chaleur, II, 64.
Refroidissement, loi de Newton, II, 75, 111 ; — exp. de Dulong et Petit, calcul de la vitesse de refr., 111 ; — appareil, 114 ; — expér. et lois dans le vide, 116 ; dans les gaz, 120 ; — loi générale, 121 ; — exp. nouvelles, 124.
Regel, II, 292.
Régulateur du *feu*, II, 186, 240.
R. à force centrifuge, 402; Molinié, 403 ; — de la lumière électrique, III, 849 ; — — des horloges, 838.
Rendement d'une machine, I, 66 ; — des *mach. à vapeur*, II, 412.
Renversement de la vapeur, II, 400, 441 ; — des courants, III, 628.
Relais *des télégraphes électriques*, III, 815.
Réomètre (ῥέος, *courant* ; μέτρον), III, 314, 524; sensibilité, 526; tables, 527; — différentiel, 315, 527; — *boussole des sinus*, 528 ; des *tangentes*, 529 ; — magnétomètre électrique, 531 ; — balance électro-magnétique, 532; — appl. des formules de Ohm au réomètre, 540.
Réophores (ῥέος, φέρω, *porter*) de la pile, III, 302.
Réostat, III, 555; unité de résistance. 556.
Réotrope (ῥέος, τρέπω, *tourner*), IV, 684.
Réotome (ῥέος, τομή, *action de couper*), III, 719; à mercure, 725.
Répétition (*méthode de*), I, 29.
Repos, *absolu* ou *relatif*, I, 43.
Répulsion *moléculaire* ; — *magnétique*, *électrique* (v. ATTRACTION).
Réseaux *parallèles*, IV, 438 ; lois, 440; — irréguliers, 442 ; à mailles non linéaires ; par réflexion, 443.
Réservoir, mesure de la capacité par rapport à celles d'une division du tube, I, 267;
R. *commun*, III, 97.
Résistance des fluides au mouvement des corps, I, 44 ; — de l'air, à la chute des corps, 85 ; à la décharge électrique, III, 192.
R. absolue des solides, I, 419 ; des chaudières, calcul, 421 ; — relative, I, 423 ; transverse, 426.
R. des fils métalliques aux courants, III, 412; des soudures, 414; au passage, loi, 567 ; — unité de rés. électrique, 556.
Résonnance, I, 479 ; multiple, 523.
Ressorts des montres, pendules, I, 412.
Résultante d'un syst. de forces, I, 58.
Réticule, I, 17, et IV, 369.
Rétine, IV, 301 ; phénomènes relatifs à sa sensibilité, 319.
Retrait *de l'argile*, II, 162; applic. au pyromètre, 184.
Rivières (température des), II, 586.
Robinet à cuvette, I, 450; — à quatre voies, 156 ; des *mach. à vapeur*, 400.
Rose des vents, II, 590 ; *thermométrique*, 610 ; *barométrique*, I, 374.
Rosée, II, 632 ; théorie de Wells, 633 ; expér. de Melloni, 633.
Rotation d'un *courant* par un *courant*, III, 637, 639, 641 ; — par un *aimant*, 662; par *la terre*, 651 ; — d'un aimant par un courant, 664; des liquides par les aimants, 665, 667 ; dans les aimants creux, 669.
R. *du plan de polarisation*, lois, IV, 613 ; mesure de la déviation, 617 ; — par divers cristaux, 621 ; par les fluides, 622, 623. — théorie de Fresnel, 624 ; décomposition d'un polarisé en deux circulaires inverses,

625; — double réfr. circulaire du quartz, 627; des liquides à pouvoir rotatoire, 628; — cause première de la rotation du plan do polarisation, 628 (v. POLARISATION).
R. *de la terre* prouvée par le pendule, I, 107; par le *gyroscope*, 109; — influence sur la pesanteur, 114.
R. *du vent* (loi do), II, 608.
Roue *de Barlow*, III, 663; — dentée de Savart, I, 493.
Roulement *du tonnerre*, expl., III, 215.

S

Saccharimètre (σάκχαρον, *sucre*; μέτρον), IV, 637.
Saisons météorologiques, II, 553.
Sang artériel et veineux, température comparée, II, 519.
Saturation *des aimants*, III, 38; des électro-aimants, 612.
S. des dissolutions, II, 298; — des vapeurs, 328.
Scintillation des étoiles, IV, 409.
Scintillomètre, IV, 410.
Section *principale* des cristaux, IV, 472.
Sel-gemme, n'absorbe pas la chaleur, II, 53; est athermochroïque, 61.
Sels, dissolution, II, 298; chaleur spécifique, état de l'eau combinée, 255; — décomposition par la décharge, III, 186; par les courants, 449; par l'étincelle de la pile, 452; — chaleur dégagée dans leur formation, II, 497.
Serein, II, 642.
Sextant, IV, 50.
Sidéroscope (σίδηρος, *fer*; σκοπέω), III, 754.
Sifflet, I, 525; d'alarme des chaudières à vapeur, II, 425; des locomotives, 439.
Simoun, vent, des déserts, II, 614.
Siphon (σίφων, *tube*), I, 337; dans un milieu quelconque, 338; applications, 339.
Sirène *acoustique*, I, 491.
Sirocco, Solano, vents, II, 612.
Soleil, constitution, II, 530; — intensité de la chaleur en différents points, 538 (v. CHALEUR SOLAIRE); de la lumière, IV, 535; — essais d'analyse de l'enveloppe, 200. — déformé à l'horizon, IV, 102; — *faux soleils*, 289, 297.
Solénoïdes, propriétés, III, 659; théorie mathématique, 660.
Solidification des liquides, II, 286; surfusion, 287; influence de la pression, 290; chang. do volume, 293; évaluation, 295.
— des sels dissous, II. 299;
— des gaz, II, 353.
Sommier de l'orgue, I, 552.
Son, *sa cause*, I, 448; propagation dans une colonne cylindrique, 458; dans un milieu indéfini, 463; vitesse des molécules d'air, 462.
— *limite* des sons perceptibles, I, 497; de durée, 517.
— *intensité*, I, 485; variations avec la distance, 487; — influence du vent, 488; intensité pendant la nuit, 489.
— *hauteur* ou *ton*, I, 490; *timbre*, 499.
— *rapport* des sons, I, 500.
S. *harmoniques*, 508; *résultants*, 514.
S. produits par les courants, III, 623; des fils télégraphiques, 627.
Sonomètre, I, 505, 566.
Soubresauts (ébullition), II, 339.
Soudures s'échauffent par les courants, III, 414; froid produit, 415; lois de l'échauffement, 416.
Soufflerie *acoustique*, I, 531.
Soufflet, I, 351, 352.
Soupape *de sûreté*, II, 336, 421.
Sources (température des), II, 581.
Sources *de chaleur*, II, 8, 451; — artificielles, actions mécaniques, 452, application de la chaleur due au frottement, 456; — compression, 458; *id*. des gaz, 459, 462; — absorption par les solides, capillarité, 466.
— *actions chimiques*, combustion, II, 467;

flamme, 470 (v. FLAMME); — mesure de la quantité de chaleur des combin. chimiques, 478 à 492; cas des décompositions, 492; lois, 501.
— chaleur produite par *induction magnéto-électrique*, III, 751.
S. *de froid*, expansion des gaz, II, 460; évaporation, 323; mélanges réfrigérants, 302.
S. *d'électricité*, frottement, III, 93, 280 (v. FROTTEMENT); pression, 291; clivage, exfoliation, 293; ébranlement direct des molécules, 294.
— actions chimiques, III, 296, 316; combustion, 317; réactions des dissolutions, 320; décompositions, 323; doubles décompositions, 324; — action des liquides sur les métaux, 324; expér. avec le condensateur, avec le multiplicateur, 325; — le métal le plus attaqué prend le fluide négatif, 327.
— *par la chaleur*, III, 362, 367 (v. PYRO-ÉLECTRICITÉ, et THERMO-ÉLECTRICITÉ).
— *physiologiques*, III, 383 (v. ÉLECTRICITÉ PHYSIOLOGIQUE).
S. *de lumière*, IV, 9; — ordre de succession des rayons colorés, II, 74, IV, 414.
Spath-d'Islande, IV, 469.
Spectre solaire, IV, 175; moyen de l'avoir pur, 188; théorie de Newton, 179; hypothèse de Brewster, 208; discussion, 210.
— *actions chimiques*, IV, 224, rayons excitateurs, continuateurs, 227; absorption des r. chimiques par les milieux, 230.
— *propriétés* éclairantes, IV, 247; image photographique du spectre, 241.
— *propriétés phosphorogéniques*, IV, 249; raies, 250.
S. *calorifique*, II, 65 (v. THERMOCHROSE).
S. *magnétique*, III, 9.
Spectromètre, IV, 198.
Sphéromètre (σφαῖρα, *sphère*; μέτρον), I, 21.
Spirales d'Airy, IV, 620.
Statique (στάω, *se tenir*), I, 54.
Stéphanomètre (στέφανος, *couronne*; μέτρον), IV, 419.
Stéréomètre (στερέος, *solide*; μέτρον), I, 311.
Stéréoscope (στερέος, σκοπέω, *regarder*), de réflexion, IV, 338; de réfraction, 339; panoramique, 341; microscope-stéréoscope, 361.
Stratification de la lumière électrique, III, 439, 733; cause, 736.
Structure des solides, I, 389; régulière, 389; irrégulière, 397; organique, 398; — changement par le temps, par la chaleur, I, 435; par les vibrations, 436; chaleur dégagée, II, 493; influence sur la capacité calorifique, 249.
Sublimation, II, 323.
Succion dans les ajutages, I, 239.
Sucre, pouvoir rotatoire, IV, 636; interverti, 636.
Surfusion, II, 287.
Suspension de Cardan, I, 284.
S. par *mirage*, IV, 107.
Sympiézomètre (συμ-πιέζω, *comprimer*; μέτρον), II, 238.
Système, ce que c'est, I, 12; des ondulations, pour la *chaleur*, II, 9, 71; pour la *lumière*, IV, 7, 384; de l'émission, 414.

T

Tables de graduation du thermo-multiplicateur, II, 34; — *hygrométriques*, méth. de Dulong, 619; de Gay-Lussac, de Melloni, 620; de M. Regnault, 621; — de réfraction atmosph., IV, 100.
Tabouret isolant, III, 118.
Taches du soleil, II, 531.
Tambour, I, 598.
Tam-Tam, I, 594.
Tate-viu, I, 296.
Tautochrone (ταυτό, *le même*; χρόνος, *temps*), I, 24.

Teinte sensible dans la polarisation chromatique, IV, 555; du verre comprimé, 588; dans la polarisation rotatoire, 616; applic. aux polariscopes, 618, 619.

Télégraphe électrique, historique, III, 798; — à aiguilles, 801; *à cadran*, 804; donnant les signaux de Chappe, 809; automatique de M. Siemens, 811; magnéto-électrique, 812; *écrivant*, de Morse, 813; de M. Froment, 816.

— *électro-chimique*, 818; autographique, III, 819; transmettant deux dépêches, simultanées en sens contraire, 820; — de quelques autres systèmes, 821.

— *portatif*, III, 831.

— système de transmission, III, 822; fils souterrains, 827; sous-marins, 827.

— applications diverses, III, 830; à la sécurité des chemins de fer, 831.

Télémètre (τῆλε, *loin*; μέτρον), IV, 374.

Télescope (τῆλε, *loin*; σκοπέω, *regarder*), IV, 366 (*v.* Lunette).

— de réflexion ou catoptrique, 378; de Newton, 378; de Grégori, 379; de Cassegrain, d'Herschel, 380; à miroir de verre argenté, 382.

Télestéréoscope, IV, 342.

Tempérament musical, I, 511.

Température, définition, II, 10, 515; mesure, 12 (*v.* Thermomètre, Thermo-multiplicateur, Pyromètre).

— de l'*air* en un même lieu, II, 548, moyenne, 549, 553; mensuelle, 551; de cinq jours, 553; à différentes latitudes, lignes *isothermes*, 553; variations sur un même méridien, 556; moyennes hybernales et estivales, 556.

— de l'hémisphère austral, II, 558; — extrêmes, 558.

— à *différentes hauteurs*, II, 562; décroissement, relation avec la pression, 564; — influence horaire, des saisons, 567; de la latitude, 568.

T. des *mers*, II, 581; causes qui la modifient, 583.

— des lacs, rivières, II, 586.

— Du sol à différentes profondeurs, II, 578; couche invariable, donne la moyenne du lieu, 580.

— des caves, II, 140; des mines, 525; des puits artésiens, 526; des sources, 581; des vents, 609.

T. des *espaces planétaires*, II, 571.

T. des *animaux*, II, 517, 520; des plantes, 524.

Tempêtes, action sur le baromètre, I, 290; II, 610.

Temps, I, 2; sa mesure, 27.

Ténacité, lois, I, 419; résistance des vases, 421.

Tension de l'*électricité* statique, III, 143; — de l'él. dynamique dans un circuit, 546; dans une plaque, 548.

— des liquides, II, 327.

— des vapeurs à saturation, II, 326 (*v.* Vapeur).

Terre, forme, I, 111; densité, masse, 127; chaleur propre, II, 525; formation, 527; état actuel, 528.

— rotation prouvée par la chute des corps, I, 78; par le pendule, 107; par le gyroscope, 109.

— action sur les aimants, III, 18; sur le fer, 20; l'action n'est que directrice, 22; mesure de la force magnétique, 25.

— action sur les courants, III, 650; courants terrestres, 650, 652; origine, 654, 753.

— rôle dans la télégraphie électr., III, 823.

Taumatrope (τόμος, *coupé*; τρέπω, *tourner*), IV, 226.

Théâtre électrique, III, 109.

Théodolyte, (θεάομαι, *regarder*; δολιχός, *distant*), I, 18.

Théorie physique, I, 11 (*v.* Système).

Thermo-baromètre, II, 237.

Thermochrose (θέρμη, *chaleur*; χρώζω, *colorer*), II, 57; — des rayons calorifiques, II, 57; leur différente réfrangibilité, 64; — de l'air, II, 538; — des corps, ré-

flexion diffuse, II, 67; — diffusion par réfraction, 70.
Thermo-électricité, III, 367; — loi relative à la température, 368; — pouvoirs th.-électr., 370; — piles, 372.
— courant dans un circuit d'un seul métal, III, 374; influence de la structure, 376; — cause des courants th.-élect., III, 376; cas d'une structure cristalline, 378; — applications à la thermométrie, 380 (v. THERMO-MULTIPLICATEUR).
Thermogène (*appareil*), II, 457.
Thermographie, IV, 247.
Thermo-manomètre, II, 424.
Thermomètre (θέρμη, *chaleur*; μέτρον, *mesure*), II, 13; construction du T. à mercure, 13; — graduation, 15; par comparaison, 21; différ. échelles, 18.
— de précision, II, 19; capacité du réservoir, 20; influence du verre sur la marche, 23; — limites, 25; sensibilité, 27.
— *à poids*, I, 22; — à réservoir intermédiaire, 24; métastatique, 27.
— *à alcool*, II, 25; comparaison des th., 25; — th. pour les basses temp., 26; compar. au th. à air, 227.
T. *à air*, II, 29; différentiel, 29, 211; histoire du thermomètre, 31.
— métallique, 182; de Borda, 183.
— *de météorologie*, manière de le placer, II, 548.
— *barométrique*, ou *hypsomètre*, 337.
— à maximum et minimum de Rutherfort, II, 542; de Six-Bellani, 543; — à déversement, 544; — *enregistreurs*, à pointage, 546; par l'électro-magnétisme, III, 843; par la photographie, I, 370.
T. de Fourier ou de contact, II, 134.
T. *électrique* de Riess, III, 179; — de Kinnersley, 124.
Thermométrographe, II, 543, 546; III, 843.
Thermo-multiplicateur, II, 32; tables de graduation, 34; d'impulsion, 36.
— comparaison au th. à mercure, III, 381.
Thermoscope de Rhumfort, II, 30.
Timbales, I, 598.
Timbre *du son*, I, 457, 499; de la voix, 644; des voyelles, 645.
Timbres et cloches, I, 594.
Tirage *des cheminées*, II, 239.
Tiroir *des mach. à vapeur*, II, 398.
Toiles *métalliques*, action sur la flamme, II, 471; applications, 472, 473.
Ton, ou hauteur d'un son, I, 490, 506; — des couleurs, IV, 223.
Tonneau de Pascal; I, 154.
Tonnerre, III, 209; roulement, 215; — en boule, 225; — dans les nuages des volcans, 242.
Tornados, II, 640, 259.
Torpille, III, 383; organe électrique, 386.
Tourmaline, comme polariscope, IV, 492. 527, 580; pince à tourmalines, 569; — est *pyro-électrique*, III, 362.
Tourniquet *électrique*, III, 151, 635; — hydraulique, I, 220; à vapeur, II, 389.
Trajectoire des projectiles, I, 91.
Translateur des télégr. électr., III, 846.
Translucidité, IV, 15, 98.
Transparence, IV, 15
Transport des liquides par les courants, III, 443; lois, 444.
— des éléments aux électrodes, III, 456; théorie de Grotthuss, 458; cas de plusieurs dissolutions, 459; — par la décharge électrique, III, 184; par choc latéral, 186, 220.
Travail d'une force, I, 64; relation avec la chaleur, II, 504; — des machines à vapeur, 408.
— de l'électricité convertie en chaleur, III, 425; — chimique dans la pile, 428, 474.
Tremblements de terre, II, 528; rencontre des deux ondes qui les propagent, I, 623.
Trembleur, des app. *électro-voltaïques*, III, 749.
Trempe de l'acier, I, 434; influence sur la force des aimants, III, 44; — du

bronze, du verre, I, 433; couleurs dans la lumière polarisée, IV, 564.
Triangle musical, I, 582.
Triprisme de Fresnel, IV, 627.
Trombe, III, 256; de terre, 257; théorie, 259.
Trompes, I, 240.
Trop-plein, I, 224.
Tube *acoustique*, I, 487; de sûreté, I, 296; de *Toricelli*, I, 280.
T. étincelant, III, 128; — de Geissler, 734.
Tubes capillaires, I, 187; tubes non mouillés, 192; théorie, 194; relation avec la forme de la surface, 204; actions à l'extrémité d'un tube, 202; mouvements dans les tubes coniques, 208.
— *écoulement* (par les), I, 241.
Tumeurs enlevées au moyen des fils incandescents par les courants, III, 412.
Tuyaux de conduite, I, 233; pour les gaz, vitesse, 349.
T. *sonores*, lois de Bernouilli, I, 526; — bouchés, 526; ouverts, 630; vérifications par l'exp., 531; — à *anche*, 647.

U

Udomètre (ὕδωρ, *eau*; μέτρον), II, 648.
Unipolarité des flammes, III, 462.
Universalité du magnétisme, III, 753, 756 (*v.* Diamagnétisme).
Uredo nivealis (neige rouge), II, 644.

V

Vapeur, formation dans le vide, II, 325; dans les gaz, 328; loi, 329; précipitation dans l'air, 331; problème des vapeurs, 332.
— mesure de la tension, II, 357; de divers liquides, 367.
— *chaleur latente*, II, 369; sous différentes pressions, 371; — liquides autres que l'eau, 376.
— *densité*, II, 379; sous diff. pressions, 382; dans l'air saturé, 384; à de très hautes températures, 386.
— *indice de réfraction*, IV, 172, 404.
— *machines*, II, 388 (*v.* Machines).
V. jet, produit de l'électricité, III, 287; machines *hydro-électriques*, 118.
V. d'essence de térébenthine, fait tourner le plan de polarisation, IV, 624.
Vapeur vésiculaire (sur la), II, 637.
Vaporisation, II, 321 (*v.* Ébullition).
Variations, du baromètre, I, 372 (*v.* Baromètre).
V. *de la déclinaison*, séculaires, III, 80; annuelles, diurnes, 81; — de *l'inclinaison*, 83; de l'intensité, 84.
— *irrégulières*, de l'aiguille aimantée, 86.
— De l'explication des variations, 91.
V. *de la température*, diurnes, II, 650; mensuelles, 651; accidentelles, moyennes de cinq jours, 653.
Vases, *communiquants*, I, 165; de tentale ou diabètes (διαβαίνω, *traverser*), 340.
— mesure de la capacité, I, 184; variation par la compression, 406; par la dilatation, II, 171; — résistance, I, 421.
— influence sur l'ébullition, II, 339.
V. *de révolution*, vibrations, I, 593.
Végétaux, produisent de la *chaleur*, II, 624; de l'électricité, III, 394; — action de l'électricité 409; des courants, 461.
Veine liquide. contraction, I, 225; section, 229; constitution, 243; cause de la division, 245; des oscillations, 247.
— choc contre un disque, I, 251; — de deux veines entre elles, 258.
Veine gazeuse, I, 345.
Vent, II, 589; direction, 590; vitesse, 592; moyenne direction, 598; —cause générale, 599; propagation, 600.
— *réguliers*, II, 601; irréguliers, 607; loi de rotation, 608.
— caractères physiques, II, 609; — chauds des déserts, 611.
Ventilateur à force centrifuge, I, 73.
Ventouse, I, 294.

Ventre *de vibrations*, I, 527.

Verges élastiques, vibrations, 575; lois, 576; lignes nodales, 576; sons engendrés, 579.

V. courbes, 581.

— vibrations longitudinales, I, 603.

Verglas (*viridis*, *glacies*, glace vive), II, 644.

Vernier, I, 15; appl. aux arcs, 16.

Verre, dilatation variable, II, 176; influence sur le thermomètre, 23, 228; trempe, I, 433; — trempé, comprimé, vibrant, infléchi, chauffé, agit sur la lumière polarisée, IV, 564 à 567.

Verres ardents, II, 55.

Verticale, I, 78.

Vessie natatoire des poissons, I, 163.

Vibrations *sonores*, I, 447; manières de faire vibrer l'air, 453; — mesure du nombre de vibrations, I, 490; méthode graphique, 494; au moyen des rapports de la gamme, 509; au moyen des battements, 515.

— *communiquées*, I, 624 (*v.* Communication)

V. *des gaz*, I, 524 (*v.* Gaz).

— *des liquides*, I, 557; dans la veine, 243, 247 (*v.* Veine liquide).

— *des solides*, transversales, I, 563; des cordes, 564 (*v.* Cordes).

— des verges élastiques, I, 575 (*v.* Verges).

— *des plaques*, 583 (*v.* Plaques).

— des vases de révolution, 593; des membranes, 595.

V. *longitudinales*; lois, I, 598, relation avec les vibrations transversales, 600; — des cordes, 601, — *lignes nodales*, caractère, 602; origine, 604.

— des corps à trois dimensions comparables, I, 612.

V. *tournantes*, I, 609; nodales, 610.

V., applications à l'étude de l'élasticité, I, 612 (*v.* Élasticité).

— dégagent de la chaleur, II, 457; de l'électricité polaire, III, 295.

— étude optique, I, 517.

Vibrations *de l'éther*, sont perpendiculaires au rayon, IV, 494; au plan de polarisation, 496; — origine et propagation, 497.

Vibroscope, I, 495.

Vide *de Toricelli*, I, 279; de Boyle, 321.

Violon, I, 573.

Vis micrométrique, I, 20.

Viscosité des liquides, I, 144; maximum et minimum, 257.

Vision (*principe de la*), IV, 14; appareil, 299 (*v.* Œil); mécanisme, 302; conditions de netteté de l'image, 304; ajustement de l'œil, 308, 311; sensibilité de la rétine, 319; durée de l'impression, 323.

— rapport entre le jugement et la sensation, 327.

V. *binoculaire*, 328; semi-décussation des nerfs optiques, 331.

— *jugement* de la distance, 332; de la grandeur, 333; de la forme, 336; influence des deux yeux, 337; — des couleurs, 343; couleurs accidentelles, 344.

V. aidée des instruments gross., IV, 349.

Vitesse dans le mouvement uniforme, I, 46; dans le mouvement varié, 47; — *virtuelles* (principes des), 67.

V. d'écoulement des liquides, I, 221; des gaz, 346; dans les tuyaux, 349.

V. *de la chaleur*, II, 41.

V. *de l'électricité*, III, 515; au moyen des fils télégraphiques, 518, 523; influence de l'état variable, 554.

V. *de la lumière*, IV, 19; méthode de Rœmer, 20; au moyen de l'aberration, 22; méthode de M. Fizeau, 23; de M. Foucault, 419; — est moindre dans le milieu le plus réfringent, 399; preuve directe, 421, 422.

V. *du refroidissement*, II, 110 (*v.* Refroidissement).

V. *du son*, I, 459; formule de Newton, 467; comparaison avec l'expérience, 468; expérience au moyen des tuyaux sonores, 535; — dans l'*eau*, 470, 558; — dans les *solides*, 472, 601; relation entre la

vitesse dans une colonne et dans un espace indéfini, 561.

Vitres, se couvrent en dedans d'humidité, II, 633 ; de givre, 635 ; — V. de glace, 309.

Voix, organe, I, 639 ; mécanisme, 640 ; étendue, 643 ; timbre, 644.

Voltamètre, III, 311, 447 ; de M. Bertin, à poids, 474 ; anomalies, 484 ; détonations, 486.

Volumes, mesure, I, 183 ; d'un vase, 184.

Volumenomètre. I, 312.

Volumètre, I, 180.

Voyelles, I, 644 ; timbre, 645.

Vue, portée, IV, 308 ; défauts, 315. (v. Vision).

X, Y, Z

Xylophotographie (ξυλον, *bois*), IV, 243.

Zéro du thermomètre, II, 15 ; déplacement, 23.

— absolu, II, 119, 314.

Zinc, *amalgamé*, distillé, propriétés dans la pile, III, 336, 337.

Zones isothermes, II, 556.

Z. des pluies, II, 650.

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE ET ANALYTIQUE.

Typogr. de Bonnal et Gibrac, rue St-Rome, 44, Toulouse.



